

# Wykorzystanie taboru kolejowego jako nośnika sensorów w zakresie monitoringu środowiska naturalnego

Jan Kotlarz<sup>1</sup>, Maciej Szypulski<sup>1,2</sup>, Katarzyna Kubiak<sup>3</sup>, Jarosław Siwiński<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PKP Informatyka sp. z o. o., Al. Jerozolimskie 142A, 02-305 Warszawa

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

<sup>3</sup> Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ – Instytut Lotnictwa, Zakład Teledetekcji, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

<sup>4</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

**Streszczenie:** Rozwój rynku IoT w Polsce może stać się czynnikiem upowszechniającym monitoring środowiska naturalnego i zwiększającym automatyzację tego działania. Pomiary wykonywane obecnie albo z użyciem zobrazowań niskorozdzielczych (dane satelitarne), albo punktowych (*in situ*) są obciążone błędami wynikającymi ze zbyt małej szczegółowości danych lub niskich rozdzielczości czasowych. Często kampanie pomiarowe są czasochłonne i generują wysokie koszty. Od wielu lat, zarówno w Europie, jak i w Ameryce Północnej, prowadzone są badania mające na celu umożliwienie użycia sensorów umiejscowionych na kolejowych platformach mobilnych (lokomotywy, wagony) w monitoringu środowiskowym. W publikacji przedstawiamy możliwość implementacji sensorów akustycznych, obrazowych oraz skaningu laserowego. Przedstawiamy przykłady zastosowań oraz odpowiadamy na pytanie o możliwość ich implementacji w Polsce.

**Słowa kluczowe:** IoT, monitoring środowiska, edge device, transport kolejowy, LoRaWAN

## 1. Wprowadzenie

W zadaniach związanych z monitoringiem środowiska naturalnego stosowane są sensory wykorzystujące promieniowanie elektromagnetyczne [1–3], fale akustyczne [4] i zapachy [5]. Umieszczenie sensorów używanych w tym procesie na nośnikach satelitarnych (Landsat [6], Eumetsat [7]), raketach sondujących [8], balonach stratosferycznych [9], platformach lotniczych [3, 10] jest często kosztowne, wymaga przeprowadzenia procedury planującej i przeprowadzającej kampanię pomiarową. Z drugiej strony umiejscowienie sensorów stacjonarnie: bezpośrednio na powierzchni [11] lub na platformach [12] ogranicza znacznie użyteczny zasięg pozyskiwanych w ten sposób danych.

Jedną z metod jednoczesnego obniżenia kosztów pozyskiwania danych, systematyzację tego procesu oraz uzyskanie pokrycia względnie dużego obszaru terenu pozyskiwanymi danymi

jest umieszczenie sensorów na platformach poruszających się. Użycie w tym celu taboru kolejowego jest zasadne z dodatkowych względów:

- kolejowy transport pasażerski, oraz w nieco mniejszym stopniu towarowy, podlega określonym z góry rozkładom jazdy, pozwalając na planowanie kampanii pomiarowych z dużym wyprzedzeniem,
- szlaki kolejowe zlokalizowane są w różnych typach ekosystemów (o dużym wpływie działalności człowieka: miejskim, rolnym, naturalnych: torfowiskach, lasach, łąkach, w pobliżu ekosystemów wodnych),
- transport kolejowy jest w większym stopniu oparty na wykorzystaniu energii odnawialnej niż transport drogowy [13].

Tabor kolejowy był już w przeszłości i jest obecnie stosowany jako nośnik sensorów służących do pomiaru sytuacji logistycznej i parametrów infrastruktury wykorzystywanej lub wspomagającej sam transport (np. monitorowanie ruchu w czasie rzeczywistym za pomocą czujników Bragga [14], monitoring parametrów stanu technicznego mostów kolejowych [15]). Wykorzystanie tych samych systemów sensorów do śledzenia położenia taboru kolejowego w czasie rzeczywistym jest obecnie przedmiotem intensywnych prac badawczych [16] i analiz wdrożeń (np. ETCS [17]).

Celem niniejszego opracowania jest przeprowadzenie analizy użyteczności obecnie prowadzonych badań związanych z monitoringiem środowiska naturalnego przy użyciu sensorów umieszczonych na taborze kolejowym na terenie Polski, szczególnie z uwzględnieniem taboru największego polskiego

### Autor korespondujący:

Jan Kotlarz, jan.kotlarz@ilot.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 02.04.2019 r., przyjęty do druku 26.06.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

i jednego z największych europejskich przewoźników towarowych – PKP CARGO.

## 2. Monitoring środowiskowy z użyciem taboru kolejowego

Obecnie w projektach związanych z monitoringiem środowiska naturalnego stosowane są sensory zarówno typu wizyjnego, akustycznego jak również sensory pasywne (skaniny laserowe).

### 2.1. Wykorzystanie sensorów typu akustycznego

Potrzeba monitorowania parametrów środowiskowych na dużą skalę w celu zarządzania i dostosowywania się do zmian środowiskowych jest dobrze znana. W ramach europejskich projektów środowiskowych od dawna stosuje się akustykę jako sposób monitoringu. Szczególnie bogata jest lista dedykowana monitoringowi akustycznemu zrealizowana w ramach instrumentu finansowego Life+ (np. „HADA – Automatic Tool for environmental diagnosis”, w ramach którego stworzono system monitorowania i zmniejszania poziomu hałasu w rejonach portowych i system reagowania na nietypowe sytuacje związane z emisją zanieczyszczeń i poziomem hałasu [18] lub „RAVE – The Green Ray of Novara”, w ramach którego rozwinęto współpracę między organizacjami prywatnymi i publicznymi w północno-zachodnich Włoszech w celu stworzenia kompletnego i zintegrowanego lokalnego systemu powolnej mobilności redukującego wpływ środowiskowy transportu kołowego oraz m.in. zmniejszenia hałasu [19]). Obecnie realizowane są projekty oparte na monitoringu akustycznym analizujące dwa różne rodzaje dźwięków środowiskowych:

1. odgłosy związane z celową komunikacją (np. odgłosy ssaków, ptaków) oraz
2. niezamierzony hałas (np. natężenie szumu w trakcie opadów atmosferycznych, hałas związany z upadkiem drzewa, ruch uliczny).

Standardowe uczenie maszynowe traktuje rozpoznawanie odgłosów ptaków jako zadanie klasyfikacyjne, czyli iteracyjne szkolenie klasyfikatora w celu rozpoznawania stałej liczby kategorii odgłosów. Zakłada się uprzednie pozyskanie wzorców akustycznych i zapisanie ich jako tzw. „learning set”. Procedura

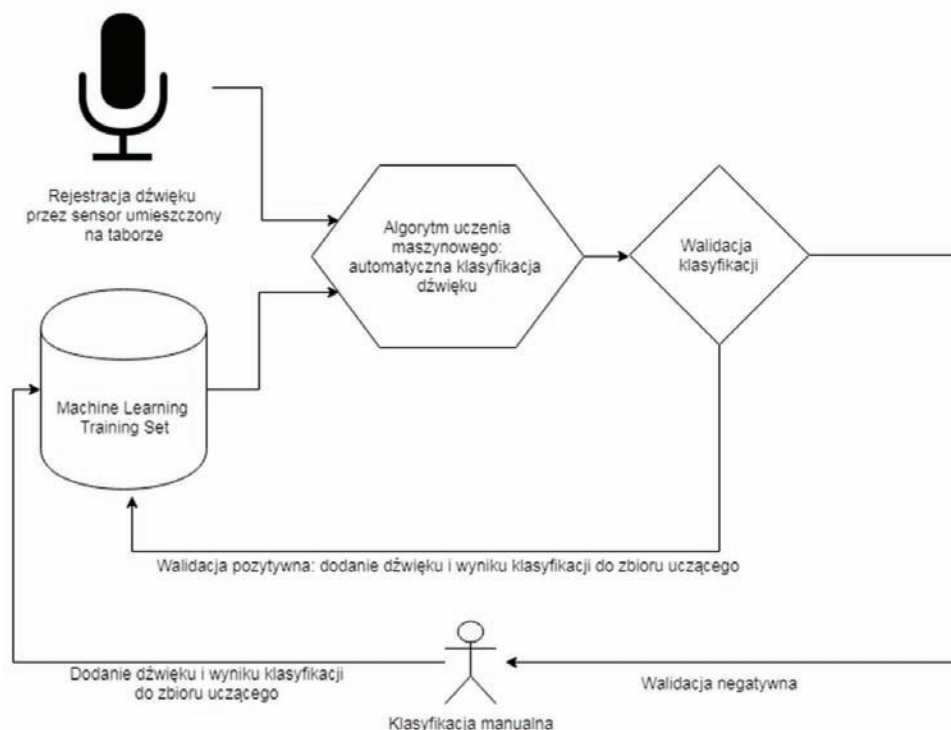
monitoringu tego typu dźwięków środowiskowych przedstawiona jest na rys. 1.

Ważną kwestią przy projektowaniu systemu IT dedykowanego tego typu monitoringowi jest umiejscowienie poszczególnych elementów na samym taborze lub w systemie centralnym. Możliwe są tu trzy rodzaje architektury:

1. Umieszczenie sensorów, elementów zapisujących dane oraz elementów analitycznych na taborze. W tym przypadku elementy elektroniczne umieszczone na taborze muszą być rozbudowane (implementacja algorytmów uczenia maszynowego) i powinny mieć dostęp do źródła zasilania innego niż akumulator. W przypadku negatywnej weryfikacji procesu klasyfikacji dźwięku jest on odrzucany (nie jest znana jego klasyfikacja, nie jest dodawany do zbioru uczącego algorytmu).
2. Umieszczenie sensorów i elementów zapisujących dane na taborze. Umieszczenie elementów analitycznych w zewnętrznym systemie IT. W tym przypadku elementy elektroniczne umieszczone na taborze są ograniczone, ale wymagana jest instalacja systemu transmisji danych do systemu centralnego (np. elementów GPRS, bluetooth, Wi-Fi). Sama klasyfikacja przez algorytm uczenia maszynowego, walidacja osiągniętego wyniku oraz akwizycja danych w zbiorze uczącym jest prowadzona w systemie IT poza taborem. Z jednej strony pozwala to na zwiększenie mocy obliczeniowej do dyspozycji algorytmu uczącego, klasyfikację manualną w czasie rzeczywistym lub równoległą, integrację danych z całego taboru w jednym miejscu, z drugiej strony każdorazowo proces klasyfikacji wymaga łączności z taborem [20] oraz w o wiele większym stopniu wykorzystywana jest transmisja danych.
3. Koncepcja hybrydowa stosowana ostatnio np. w architekturach opartych na platformie *Azure* firmy Microsoft [21]. Zgodnie z tą koncepcją na taborze kolejowym powinien zostać umieszczony sensor wraz z niewielkim urządzeniem elektronicznym (np. Raspberry PI). Urządzenie to (tzw. *edge device*) ma za zadanie akwizycję danych z sensora oraz klasyfikację w oparciu o uproszczoną metodykę. W przypadku negatywnej walidacji wyniku przez system łączności, surowe dane są przekazywane do systemu centralnego i tam poddane bardziej zaawansowanej analizie. W przypadku weryfikacji pozytywnej do systemu centralnego może być przesłany tylko

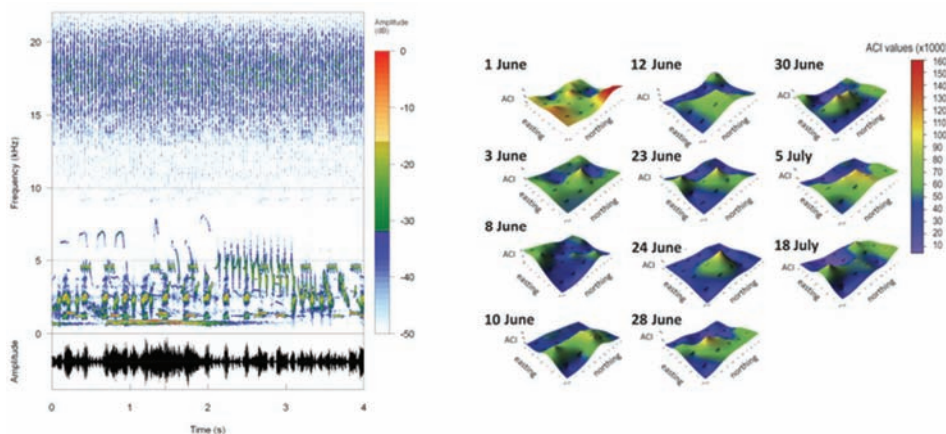
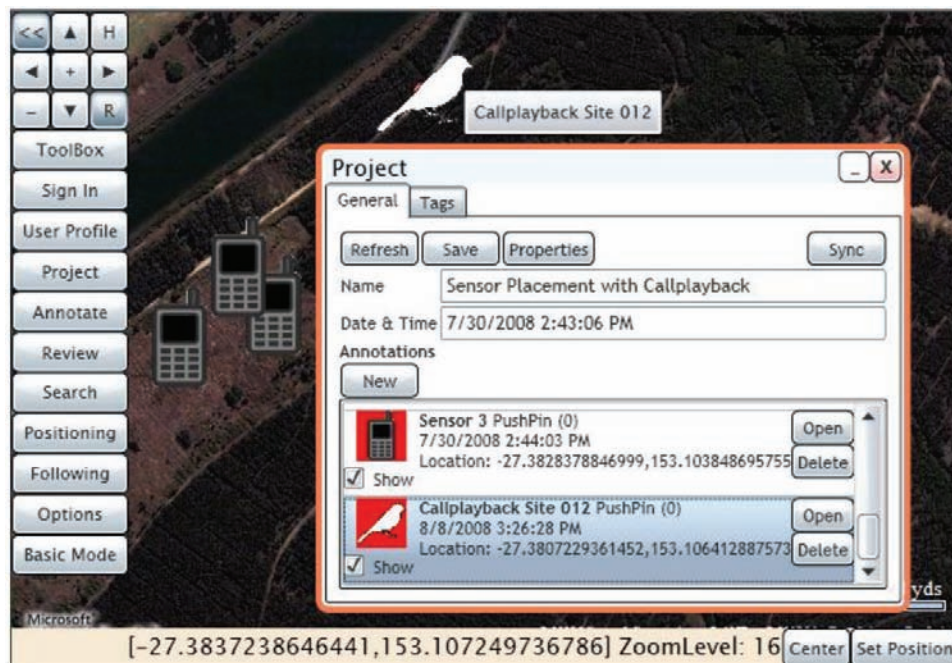
wynik klasyfikacji. Urządzenia są sterowane z poziomu systemu centralnego, tj. na podstawie danych z wszystkich sensorów i analiz wykonywanych w systemie centralnym uproszczona metodyka jest poddawana wersjonowaniu (aktualizacji). Architektura tego typu na pewno znacznie odciąża system centralny, z drugiej strony pozwala na autonomiczną pracę w czasie braku łączności.

Dopasowywanie wzorców akustycznych zostało dotychczas z powodzeniem zastosowane w przypadkach, w których wzorce są dobrze zdefiniowane, tzn. mają charakterystyczne cechy odróżniające. Dotyczy to wielu odgłosów zwierząt. Integrację zbiorów danych tego typu przez sieć Internet zaproponowali naukowcy z Queensland University of Technology



Rys. 1. Schemat procesu klasyfikacji zarejestrowanego dźwięku w oparciu o metodykę uczenia maszynowego

Fig. 1. The scheme of the classification process of recorded sound based on the machine learning methodology



Rys. 2. Pozyskiwanie, przetwarzanie i analiza danych akustycznych. Przykładowy interfejs użytkownika w programie obsługującym proces detekcji odgłosów ptaków (na górze), spektrogram profili częstotliwości w czasie odgłosów pięciu ptaków (na dole, po lewej), mapy akustyczne wykonane na podstawie 20 sensorów identyfikujące położenie biotopów w Toskanii (na dole, po prawej)

Fig. 2. Acquisition, processing, and analysis of acoustic data. The sample user interface in the program that supports the process of bird sounds detection (top), the spectrogram of frequency profiles during the sounds of five birds (bottom, left), acoustic maps made based on 20 sensors identifying the location of the biotopes in Tuscany (bottom, right)

i Michigan State University (tzw. „Acoustic Environmental Observatory” [22]).

Implementacja metodyk opracowanych na potrzeby monitoringu środowiska naturalnego może być zaimplementowana również w zagadnieniach akustycznych związanych ze środowiskiem życia człowieka. Przykładowo system tego typu został wdrożony w Brisbane. Analizuje on otoczenie dźwiękowe w cyklu 24-godzinny. Łącząc wyniki kilkudniowej analizy można zaobserwować, w jaki sposób wykorzystuje się dostępną przepustowość dróg, a tym samym prowadzić monitoring zakładanego wpływu na środowisko naturalne. W pobliżu lotniska w Brisbane, stosując rozwiązanie tego typu, zaobserwowano gwałtowny wzrost liczby i zróżnicowania typów samochodów około godziny 5-ej rano. Parametry te stopniowo zmniejszały się w ciągu dnia [22].

Zastosowanie metodyk akustycznych na generującym hałas i poruszającym się taborze z oczywistych względów może być utrudnione, jednak dwa czynniki charakteryzujące towarowy transport kolejowy w Polsce sprzyjają zmniejszeniu znaczenia tych zakłóceń:

1. tabor w transporcie towarowy rozwija maksymalną prędkość wyznaczoną dla tego typu transportu i często jest to prędkość nieprzekraczająca 30 km/h;

2. metodyki można aplikować dla stanowisk postojowych (bocznic kolejowe) często rozlokowanych w atrakcyjnych ekologicznie miejscach (las, nieużytki, łąki, pastwiska); należy zauważyć, że tabor towarowy w większości czasu nie porusza się albo będąc do dyspozycji planowanych przewozów, albo oczekując na przejazd kolejnym odcinkiem trasy.

Na ten problem zwrócono uwagę w monografii J. Skibickiego „Wizyjne metody pomiarowe w diagnostyce górnej sieci trakcyjnej” [23].

## 2.2. Wykorzystanie skaningu laserowego

Innowacyjną metodę lokalizacji i pozyskania podstawowych parametrów drzew zlokalizowanych wzdłuż szlaków kolejowych zaproponowano w Fińskim Instytucie Geodezyjnym w Masali. Ich rozwiązanie łączy dwie metody skaningu laserowego – lotniczy (ALS) i mobilny (MLS) [24]. Drzewa są ważnym elementem środowiska kolejowego, który często w trakcie modelowania 3D jest trudny do wyodrębnienia (obiekt tego typu jest nieciągły, często niezbędne jest zastosowanie zaawansowanych algorytmów topologicznych w celu klasyfikacji punktów należących do korony drzewa, pnia, podłoża itp. [20, 25]). Ekstrakcja drzew z punktów pozyskanych w ALS była pierwotnie wykorzystywana



w inwentaryzacji obszarów leśnych (gęstość punktów wynosiła jedynie 2–8/m<sup>2</sup>). Na bazie szeroko przeprowadzonych analiz punktów pozyskanych z ALS i MLS w Niemczech, Szwecji, Finlandii, Norwegii, Tajwanie, USA, Włoszech i Szwajcarii [26] określono, że na potrzeby detekcji drzew w skrajni torów kolejowych najbardziej wydajne były dwa algorytmy:

- FGI\_LOCM: lokalne wykrywanie maksimum wysokości, algorytm najpierw określał lokalne maksima w danej lokalizacji, a następnie wyznaczał korony drzew przez znalezienie najwyższej wartości w każdym segmencie drzewa. Wyniki tych metod były dokładniejsze niż analizy ręczne,
- FGI\_MCV: wykrywanie drzewa oparte na krzywiźnie pokrycia terenu.

Warto zauważyć, że konkurencyjnym algorytmem detekcji korony drzewa, jego położenia i wysokości jest algorytm odwróconej zlewni zaproponowany w Instytucie Badawczym Leśnictwa i szeroko stosowanym w projekcie HESOFF w Instytucie Lotnictwa dla drzewostanów w centralnej i zachodniej Polsce [24]. Wynikiem zarówno analiz zaproponowanych przez zespół fiński oraz zespoły polskie było określenie parametrów drzew:

- położenie drzewa (współrzędne GPS),
- wysokość drzewa,
- pierśnica drzewa (tzw. DBH),
- typ drzewa (iglaste, liściaste, a w przypadku dodatkowej integracji danych ze zdjęć wielospektralnych nawet określenie konkretnego gatunku).

Warto zauważyć, że najlepsze rezultaty analiza danych pochodzących ze skaningu laserowego przyniesie, gdy dla tego samego terenu dysponujemy danymi innego typu, np. zobrazowaniami wielospektralnymi, geodezyjnymi bazami danych, danymi z sensorów GPS itp.

### 2.3. Wykorzystanie sensorów obrazowych

Dane obrazowe pozyskiwane są z elementów infrastruktury kolejowej, który dysponuje swoim systemem zasilania. Elementy te w ogromnej większości przypadków są posadowione na lokomotywie. Głównym przeznaczeniem tych systemów są: monitoring trakcji w trakcie poruszania się składu oraz monitoring pracy maszynisty [27]. Dane obrazowe pozyskiwane w ten sposób, były wielokrotnie wykorzystywane w tworzeniu metod służących bezpieczeństwu transportu, np. detekcji obiektów w obrębie torowiska [28].

Metodyki tego typu mogą być wykorzystane w minimalizowaniu negatywnych skutków takich zjawisk ekologicznych, jak np. przerwanie szlaków migracyjnych, degradacja jakości siedlisk i warunków bytowania zwierząt oraz utraty siedlisk. Badania nad negatywnym wpływem linii kolejowych na ekologiczną stabilność obszarów leśnych prowadzone były od połowy lat 90. XX wieku, jednak w literaturze specjalistycznej występuje wyraźna podreprezentatywność takich badań w stosunku do badań transportu kołowego drogowego [29]. W związku ze zwiększeniem częstotliwości przejazdów pociągów wzrasta śmiertelność zwierzyny leśnej na skutek kolizji z pociągami, a kluczowymi czynnikami wpływającymi na częstość wypadków są: szerokość linii transportowej, natężenie ruchu, prędkość i szerokość pojazdów oraz mobilność zwierząt. Najwięcej kolizji notuje się na liniach dwutorowych, o większym natężeniu ruchu i na liniach kolejowych dużych prędkości, wiele kolizji zdarza się na liniach jednotorowych o ograniczonej prędkości pociągów i niskim natężeniu ruchu. Badania przeprowadzone w Polsce (luty–październik 2015 r.) wskazują, że gatunkiem najczęściej ulegającym kolizjom jest dzik (69,2%), sarna (15,4%), lis pospolity (7,7%), jeleń i kuna leśna (po 3,8%). Przeprowadzone badania wykazały konieczność przeciwdziałania dzieleniu siedlisk ssaków [30], przede wszystkim kopytnych [31]. Sporadyczne kolizje z pociągami nie stanowią zagrożenia dla dużych populacji gatunków pospolitych (jeleń, sarna, dzik, lis). Jednak nawet pojedyncza śmierć gatunków

rzadkich i chronionych (np. wilka *Canis lupus* czy rysia *Lynx lynx*), o małych zagęszczeniach może stanowić poważną stratę w populacji [32]. Najbardziej zagrożone są duże, mało liczne ssaki, które wymagają rozległych arealów życiowych [33].

Należy zauważyć, że mimo ogromnego potencjału systemów obrazowych w przeciwdziałaniu ze zderzeniami z ssakami, nie powstały do tej pory systemy automatyzujące proces informowania maszynisty o tego typu przeszkodzie w rejonie torowiska na bazie samych kamer pasywnych. Wieloczułnikowy system wykrywania przeszkód do użytku na torach kolejowych przetestowano w Niemczech na początku lat 2000. Zastosowane w eksperymencie czujniki to: kamery wideo (pasywne optycznie), ale jednocześnie LIDAR (sensor aktywny optycznie). Obiekty, których detekcja została przeprowadzona przez czujniki, zostały zunifikowane w systemie informatycznym pojazdu, sklasyfikowane, a ich opis przesyłany jest do centralnej jednostki. Wykazano, że połączenie aktywnych i pasywnych czujników optycznych oraz bazy danych torów kolejowych prowadzi do bardzo wysokiej wydajności systemu. Ogólna skuteczność wykrywania okazała się porównywalna z reakcją człowieka w zasięgu do 400 m w typowych warunkach pracy. Prototyp systemu wypróbowano w szynowym pojeździe testowym (Train Control TestCar) jadącym z prędkością do 120 km/h na duże odległości w Niemczech [34].

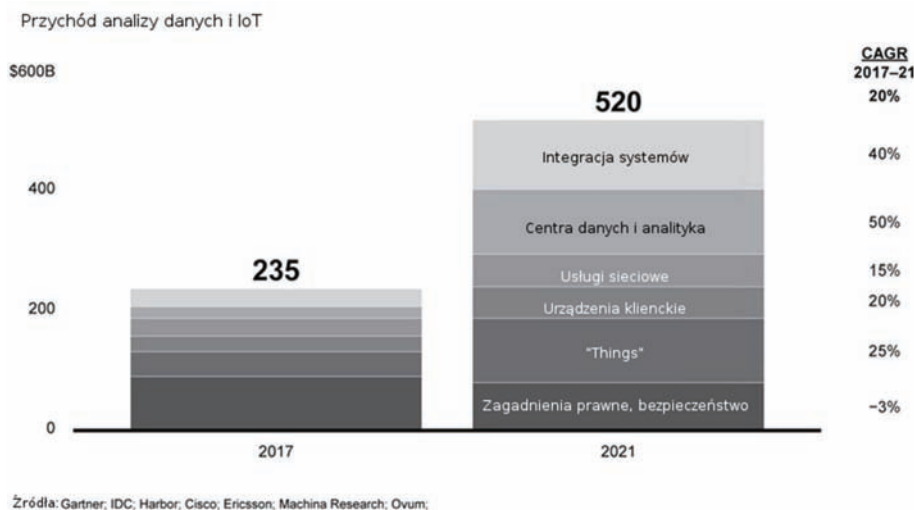
Kamery umieszczone na taborze można wykorzystać w celu oszacowania liczebności populacji dużych zwierząt w modelu losowego spotkania (REM), szczególnie w modelach gęstości, które nie wymagają pełnego rozpoznawania poszczególnych zwierząt. Szwedzki zespół badawczy oszacował różne opcje upraszczania REM pod względem oszacowania odległości i kąta detekcji (dane surowe vs. modelowane) oraz dziennego tempa ruchu saren i łosi [35]. Wyniki badań sugerują, że pułapki kamerowe mogą być solidnym uzupełnieniem danych o liczebności oborników podczas monitorowania kopytnych. Szczególnie uproszczone modele REM mogą mieć zastosowanie w monitoringu prowadzonym z platform kolejowych.

W trakcie prac badawczych opracowano wiele metod określania charakterystyki dynamicznej obiektów budowlanych możliwych do integracji w procesie przetwarzania danych obrazowych z lokomotyw. Jedną z nich, opracowaną przez warszawski Instytut Dróg i Mostów bazuje na danych fotogrametrycznych i dodatkowym systemie odniesienia danych obrazowych, który zmniejsza czułość detekcji zmian konstrukcyjnych na wibracje. Metoda służy do monitorowania i pomiaru w czasie rzeczywistym przemieszczeń wybranych punktów w konstrukcjach mostowych. Ma zastosowanie szczególnie w przypadku pomiarów trudno dostępnych miejsc na mostach [36].

Pomiary dynamicznego przemieszczenia elementów konstrukcyjnych wykorzystywane są obecnie również z użyciem komercyjnych technik cyfrowej korelacji obrazów 2D (DIC). Systemy te zapewniają precyzyjne pomiary przemieszczeń bezdotykowych jednocześnie w wielu miejscach mostu za pomocą łatwo modyfikowanej konfiguracji kamery [37]. Ciekawą propozycją jest również skanowanie w paśmie podczerwonym i optyczne metody rekonstrukcji obiektów 3D [38].

### 2.4. Metoda generowania sygnałów ostrzegawczych

Komplementarną metodą minimalizacji wpływu na degradację i fragmentację populacji ssaków jest podejście zaproponowane przez zespół kanadyjski [39]. Zaproponowano metodę dostarczania zwierzętom sygnałów ostrzegawczych, które są wyzwalane przez zbliżające się pociągi, szczególnie w obszarach o wysokim ryzyku uderzenia. Testowany system emitował sygnały świetlne i dźwiękowe około 20 s przed przyjazdem pociągu do miejsca, w którym system jest rozstawiony. Przebadano dwa projekty systemu ostrzegawczego:



Rys. 3. Wyniki badań Bain & Company nad rynkiem IoT w najbliższym pięcioleciu  
Fig. 3. Results of Bain & Company research on the IoT market in the next five years

1. prowadzący detekcję przejeżdżających pociągów i bezprzewodowo przekazujący te informacje do urządzeń ostrzegawczych znajdujących się dalej na torze,
2. integrujący wykrywanie pociągów na odległość z sygnałami ostrzegawczymi w jednym urządzeniu.

Najbardziej niezawodny system sensorów był wyposażony w czujniki magnetyczne lub wibracyjne i przekazywał informacje do urządzeń ostrzegawczych zgodnie z projektem pierwszym.

### 3. Możliwość prowadzenia monitoringu z taboru kolejowego w Polsce

Transport kolejowy jest dynamicznie rozwijającą się gałęzią logistyki w Polsce. Obecnie następuje bardzo intensywny proces cyfryzacji tego rodzaju transportu; nie tylko w zakresie wykonania i potwierdzania dostaw, ale także monitorowania i kontroli przewozów. Rozproszeni globalnie i lokalnie uczestnicy łańcuchów transportowych integrują i przetwarzają w chmurach obliczeniowych coraz większy zakres danych pochodzących m.in. z inteligentnej infrastruktury transportowej i systemów IoT. Proces ten powoduje zwiększenie liczby czujników, sensorów oraz tzw. inteligentnych urządzeń końcowych w obszarze transportu kolejowego.

Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez wiodące korporacje związane z koncepcją akwizycji i przetwarzania danych wykorzystujące inteligentne sensory, rynek IoT wzrośnie z 235 miliardów USD w 2017 r. do 520 miliardów USD w 2021 r., w tym o 25% wzrośnie udział finansowania „things”, czyli samych sensorów umieszczanych obecnie na taborze w Polsce. O 15% wzrosną nakłady na transmisję danych, a aż o 50% wzrosną nakłady na bazy danych i ich analitykę.

Dodatkowo łańcuchy transportowe, dzięki wykorzystaniu sieci sensorycznych oraz integracji danych, staną się źródłem danych związanych ze środowiskiem naturalnym. Dostęp do danych i ich wykorzystanie ułatwią ogólnopolskie projekty cyfryzacji transportu, przede wszystkim:

1. budowa i wdrożenie usług cyfrowych Krajowego Punktu Dostępowego (KPD) do Informacji o Warunkach Ruchu,
2. wdrożenie ogólnodostępnej architektury sieci sensorycznej i systemu agregacji danych o przepływach towarów – z 1000 stacji bazowych multimodalnej sieci szkieletowej WSN (ang. *Wireless Sensor Network*) dla potrzeb monitorowania, identyfikowania i lokalizowania środków transportu i towarów połączonych z bazą EPCIS (ang. *Electronic Product Code Information Services*) w Wielkopolsce.

#### 3.1. Dostępność infrastruktury

Liczba potencjalnych platform sensorów utrzymuje się od 2012 r. na poziomie: 3500–4000 lokomotyw oraz 90 000–100 000 wagonów towarowych. Średni wiek lokomotyw utrzymuje się na poziomie około 35 lat, a wagonów na poziomie około 28 lat. Proces wymiany taboru jest ograniczony. W procesie projektowania systemów akwizycji danych należy założyć dostępność podstawowej infrastruktury na lokomotywach (zasilanie elektryczne, system lokalizacji GPS) oraz brak infrastruktury na wagonach. Powoduje to konieczność założenia, że systemy sensorów aktywnych będą możliwe do instalacji wyłącznie na lokomotywach, natomiast na wagonach możliwa jest instalacja systemów pasywnych lub o niskim poborze mocy.

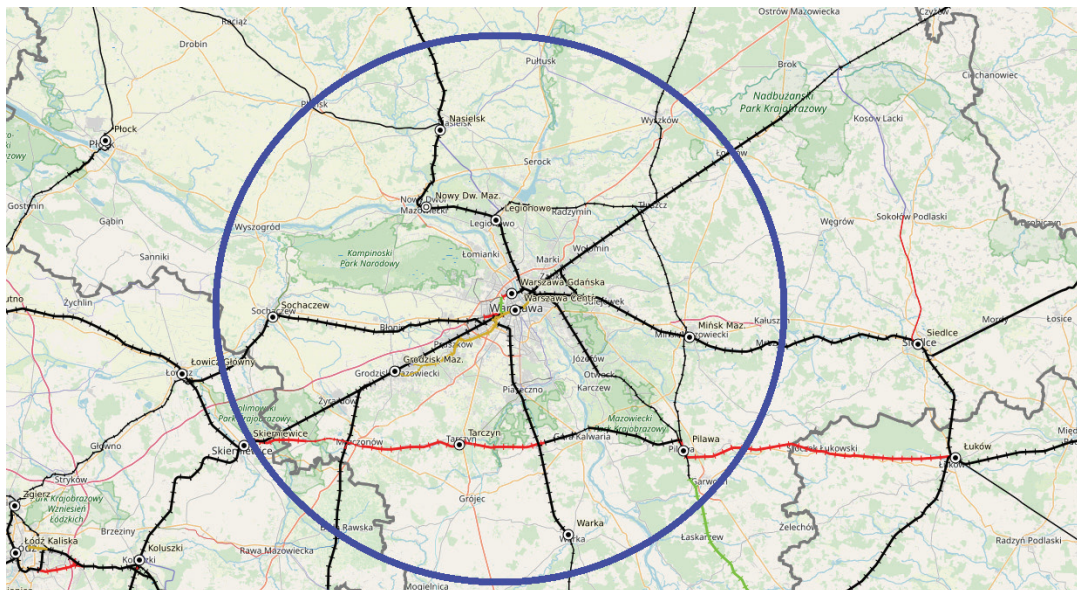
Udział przewoźników towarowych w obszarze kolejowym wskazuje na dominację kilku czołowych graczy na rynku: PKP CARGO LOGISTICS (około 50% udziału w wolumenie masy), Lotos Kolej, PKP LHS, DB Cargo i CTL Logistics. Dla dużych projektów środowiskowych ważne jest zatem tworzenie konsorcjów projektowych z udziałem w/w przedsiębiorstw.

Ścisłe związany z bezpieczeństwem środowiska naturalnego jest związany stan techniczny infrastruktury kolejowej. Zgodnie z art. 61 ust. 2 prawa budowlanego [40] właściciel lub zarządca obiektu budowlanego jest zobowiązany zapewnić, dochowując należytej staranności, bezpieczne użytkowanie obiektu w razie wystąpienia czynników zewnętrznych oddziałujących na obiekt, związanych z działaniem człowieka lub sił natury, takich jak: wyładowania atmosferyczne, wstrząsy sejsmiczne, silne wiatry, intensywne opady atmosferyczne, osuwiska ziemi, zjawiska lodowe na rzekach, morzu oraz jeziorach i zbiornikach wodnych, pożary lub powódzie, w wyniku których następuje uszkodzenie obiektu budowlanego lub bezpośrednie zagrożenie takim uszkodzeniem, mogące spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, bezpieczeństwa mienia lub środowiska.

Szybkie zdiagnozowanie pogorszenia stanu technicznego pozwala na wyłączenia danego obiektu z eksploatacji i wykonanie prac naprawczych, przed wystąpieniem np. katastrofy ekologicznej poprzez wykoślenie pociągu z chemikaliami. Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynierskich oraz instrukcje ich utrzymania przedstawione są w dokumentach wykonawczych i eksploatacyjnych [41, 42].

Obiekty budowlane powinny być w czasie ich użytkowania poddawane przez właściciela lub zarządcę kontroli okresowej obejmującej swym zakresem sprawdzenie stanu technicznego, m.in. instalacji i urządzeń służących ochronie środowiska, jakimi niewątpliwie są obiekty infrastruktury kolejowej.





**Rys. 4. Szacunkowy zasięg nadajnika sieci LoRaWAN umiejscowionego na jednym z biurowców w centrum Warszawy. Zaznaczono linie kolejowe węzła warszawskiego: barwą czarną linie transportu osobowego i towarowego, barwą czerwoną linie kolejowe transportu towarowego**  
**Fig. 4. Estimated coverage of the LoRaWAN network transmitter located on one of the office buildings in the center of Warsaw. The railway lines of the Warsaw node have been marked: the black color of passenger and freight transport lines, the color of the red railway lines of freight transport**

### 3.2. Problem transmisji danych

W kontekście transmisji danych z sensorów umieszczonych na wagonach ważnym elementem projektów jest transmisja danych do systemu centralnego. Obiecującym rozwiązaniem jest dynamicznie rozwijająca się sieć LoRaWAN. LoRaWAN jest standardem bezprzewodowej komunikacji sieciowej przeznaczonym dla urządzeń IoT, zoptymalizowanym pod kątem minimalizacji poboru energii. Sieć ta dedykowana jest do przesyłania niewielkich paczek danych – wszędzie tam, gdzie wysyłanie statusu, rezultatu pomiaru czy stanu urządzenia realizowane jest raz na jakiś czas. LoRaWAN jest siecią typu LPWAN (ang. *Low Power Wide Area Network*). Podstawowym elementem infrastruktury tej sieci jest brama (gateway). Bezprzewodowo komunikuje się z węzłami końcowymi sieci, czyli np. modułami IoT. Z drugiej strony, za pomocą bardziej standardowych protokołów (m.in. Ethernet, Wi-Fi lub 3G) łączy się z serwerami sieciowymi (chmurami) umożliwiając transmisję zgromadzonych danych do oprogramowania klienta.

Umożliwienie transmisji danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego, z lokalizacji o niskim stanie infrastruktury, takich jak duże obszary leśne, obszary bagienne itp., będzie stanowiło gwarancję dostępności danych środowiskowych. Technologia LoRaWAN pozwala na osiągnięcie niedostępnych do tej pory zasięgów dla urządzeń pracujących w paśmie 868 MHz w paśmie nielicencjonowanym, np. obecnie zasięg nadajnika warszawskiego wynosi ok. 60 km, co pozwala zarówno na pokrycie zasięgiem całego warszawskiego węzła kolejowego, jak również linii kolejowych w obrębie Bolimowskiego Parku Krajobrazowego, Chojnowskiego Parku Krajobrazowego, Mazowieckiego Parku Krajobrazowego i Lasów Chotomowskich.

## 4. Wnioski

Prowadzenie monitoringu środowiska naturalnego, elementów krajobrazu oraz wpływu infrastruktury kolejowej na środowisko za pomocą sensorów umieszczonych na elementach taboru kolejowego jest wciąż nieobecne w Polsce. Projekty badawcze przeprowadzone w Europie i Ameryce Północnej wskazują, że ten sposób zbierania danych może być cennym uzupełnieniem obecnie dostępnych informacji takich jak zobrazowania satelitarne czy dane pobierane *in situ*. Szczególnie ważne jest zastosowanie tego rodzaju akwizycji danych w odniesieniu do monitoringu zwi-

erząt (ptaki, duże ssaki), drzewostanów oraz wpływu infrastruktury kolejowej na środowisko. Zastosowanie w monitoringu mają zarówno sensory akustyczne jak i obrazowe, jednak najbardziej powszechne są obecnie zastosowania skaningu laserowego. Sensory akustyczne mają przede wszystkim zastosowanie w projektach monitorujących siedliska ptaków oraz badających wpływ hałasu infrastrukturalnego na siedliska. Sensory obrazowe znajdują zastosowanie w projektach przeciwdziałających bezpośredniemu negatywnemu wpływowi ruchu kolejowego na zwierzęta w aspekcie przecinania przez linie kolejowe szlaków migracyjnych. Drugim zastosowaniem sensorów obrazowych jest badanie wpływu infrastruktury kolejowej na środowisko w bezpośrednim otoczeniu. Znacznym ułatwieniem w implementacji tego rodzaju monitoringu środowiska jest wzrastający obecnie rynek IoT oraz standaryzacja urządzeń. Implementacja tego typu metodyki w Polsce wymaga przede wszystkim realizacji dużych projektów w kooperacji z największymi przewoźnikami. Tylko w ten sposób uzyskany zostanie efekt skali oraz wykorzystana zostanie regularność połączeń kolejowych.

### Bibliografia

1. Kennedy R., *Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and trade-offs in the design of landscape monitoring projects*, "Remote Sensing of Environment", Vol. 113, No. 7, 2009, 1382–1396, DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.018.
2. Kotlarz J., Kacprzak M., *Algorytm automatycznego oszacowania różnicowania gatunkowego drzewostanu z wykorzystaniem zdjęć RGB koron drzew*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 23, Nr 1, 2017, 63–70, DOI: 10.14313/PAR\_223/63.
3. Kotlarz J., Kubiak K., Kacprzak M., Czapski P., *Estimation of tree species diversity of forest stands based on their spectral reflectance*, "Sylvan", Tom 160, Nr 12, 2016, 1036–1045, DOI: 10.26202/sylvan.2016005.
4. Frstrup K.M., Mennitt D., *Bioacoustical monitoring in terrestrial environments*, "Acoustics Today", Vol. 8, No. 3, 2012, 16–24.
5. Gardner J., Bartlett P.N., *A brief history of electronic noses*, "Sensors and Actuators B: Chemical", Vol. 18, No. 1, 1994, 210–211, DOI: 10.1016/0925-4005(94)87085-3.

6. Seto K.C., Woodcock C.E., Song C., Huang X., Lu J., Kaufmann R.K., *Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM*, "International Journal of Remote Sensing", Vol. 23, No. 10, 2002, 1985–2004, DOI: 10.1080/01431160110075532.
7. Kamiński Ł., Kulawiak M., Ciżmowski W., Chybicki A., Stepnowski A., Orłowski A., *Web-based GIS dedicated for marine environment surveillance and monitoring*, "OCEANS 2009-EUROPE", 2009, 1–7, DOI: 10.1109/OCEANSE.2009.5278151.
8. Webb W.L., Christensen W., *Inter-Range Instrumentation Group Participation in the Meteorological Rocket Network*, "Bulletin of the American Meteorological Society", Vol. 43, Grudzień 1962, 640–649, DOI: 10.1175/1520-0477-43.12.640.
9. Kerr J.B., McElroy C.T., *Measurement of stratospheric nitrogen dioxide from the AES stratospheric balloon program*, "Atmosphere", Vol. 14, No. 3, 1976, 166–171, DOI: 10.1080/00046973.1976.9648412.
10. Skarlatos D., Marinos V., *Vegetation removal from UAV derived DSMS, using combination of RGB and NIR imagery*, Proc. SPIE 10773, Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018), 2018, 255–262, DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-255-2018.
11. Parham J., Crall J., Stewart C., Berger-Wolf T., Rubenstein D., *Animal Population Censusing at Scale with Citizen Science and Photographic Identification*, [in:] AAAI 2017 Spring Symposium on AI for Social Good (AISOC), 2017.
12. Yuan C., Zhang Y., Liu Z., *A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques*, "Canadian Journal of Forest Research", Vol. 45, No. 7, 2015, 783–792, DOI: 10.1139/cjfr-2014-0347.
13. Coen D., Héritier A., *Refining regulatory regimes: utilities in Europe*, Edward Elgar Publishing, 2005.
14. Filograno M.L., *Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors*, [in:] 2010 Joint Rail Conference, 2010.
15. Sala D., Motylewski J., Kołakowski P., *Wireless transmission system for a railway bridge subject to structural health monitoring*, "Diagnostyka", Nr 2(50), 2009, 69–72.
16. Faxun M., Ruije X., Nan X., *Analysis of railway subgrade frost heave deformation based on GPS*, "Geodesy and Geodynamics", Vol. 7, No. 2, 2016, 143–147, DOI: 10.1016/j.geog.2016.04.001.
17. Albrecht T., Luddecke K., Zimmermann J., *A precise and reliable train positioning system and its use for automation of train operation*, [w:] 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), IEEE, 2013, DOI: 10.1109/ICIRT.2013.6696282.
18. Guerra Sierra A., *HADA – Automatic Tool for environmental diagnosis*, 2005. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=2105](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2105).
19. Vallaro P., *RAVE – The Green Ray of Novara*, 2005. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s\\_ref=LIFE02%20ENV/IT/000106](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s_ref=LIFE02%20ENV/IT/000106).
20. Kotlarz J., Kubiak K., Spiralski M., *Monitoring effects of drought on nitrogen and phosphorus in temperate oak forests using machine learning techniques*, "Preprints", 2018, DOI: 10.20944/preprints201810.0191.v1.
21. Microsoft, *Microsoft Azure IoT Reference Architecture Version 2.1*, 26. 9. 2018. [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/pl-pl/services/iot-edge/>.
22. Manson R., *Towards an acoustic environmental observatory*, [w:] *IEEE Fourth International Conference on eScience'08*, 2008, DOI: 10.1109/eScience.2008.16.
23. Skibicki J., *Wizyjne metody pomiarowe w diagnostyce górnej sieci trakcyjnej (1–226)*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018.
24. Zhu L., Hyppa J., *The use of airborne and mobile laser scanning for modeling railway environments in 3D*, "Remote Sensing", Vol. 6, No. 4, 2014, 3075–3100, DOI: 10.3390/rs6043075.
25. Kotlarz J., Nasiłowska S., Rotchimmel K., Kubiak K., Kacprzak M., *Species Diversity of Oak Stands and Its Significance for Drought Resistance*, "Forests", Vol. 9, No. 9, 2018, DOI: 10.3390/f9030126.
26. Kaartinen H., Hyypä J., Yu X., Vastaranta M., Hyypä H., Kukko A., Holopainen M., *An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning*, Remote Sensing, Vol. 4, No. 4, 2012, 950–974, DOI: 10.3390/rs4040950.
27. Sriwardene A.S., Viraj M.A., Muthugala J., Buddhika A.G., Jayasekara P., *Vision based smart driver assisting system for locomotives*, [w:] 2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFS), 2016, DOI: 10.1109/ICIAFS.2016.7946551.
28. Otha M., *Level crossings obstacle detection system using stereo cameras*, "Quarterly Report of RTRI", Vol. 46, No. 2, 2005, 110–117, 10.2219/rtriqr.46.110.
29. Popp J.N., Boyle S.P., *Railway ecology: Underrepresented in science?*, "Basic and Applied Ecology", Vol. 19, 2017, 84–93, DOI: 10.1016/j.baae.2016.11.006.
30. Mateo-Sánchez M.C., Cushman S.A., Saura S., *Connecting endangered brown bear subpopulations in the Cantabrian Range (north-western Spain)*, "Animal Conservation", Vol. 17, No. 5, 2014, 430–440, DOI: 10.1111/acv.12109.
31. Ito T.Y., Lhagvasuren B., Tsunekawa A., Shinoda M., Takatsuki S., Buuveibaatar B., Chimeddorj B., *Fragmentation of the habitat of wild ungulates by anthropogenic barriers in Mongolia*, "PLoS One", Vol. 2, No. 1–13, 2013, 1–8, DOI: 10.1371/journal.pone.0056995.
32. Olkowska E., Szymankiewicz K., Sękiewicz M., *Ekspertyza dotycząca wpływu linii kolejowych na zwierzęta oraz szlaki migracji dla projektów inwestycyjnych z perspektywy 2014–2020, Część nr 1 Ssaki, z wyjątkiem nietoperzy, ETAP III*, PKP PLK S.A., Warszawa 2015.
33. Stolarski M., Żyłkowska J., *Aktywne metody ochrony zwierząt na liniach kolejowych*, "TTS Technika Transportu Szybnego", R. 14, Nr 25–26, 2008, 62–65.
34. Mockel S., Scherer F., *Multi-sensor obstacle detection on railway tracks*, Proceedings of IEEE IV 2003 Intelligent Vehicles Symposium, 2003, DOI: 10.1109/IVS.2003.1212880.
35. Pfeffer S.E. et al., *Pictures or pellets? Comparing camera trapping and dung counts as methods for estimating population densities of ungulates*, "Remote Sensing in Ecology and Conservation", Vol. 4, No. 2, 2018, 173–183, DOI: 10.1002/rse.2.67.
36. Olaszek P., *Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method*, "Measurement", Vol. 25, No. 3, 1999, 227–236, DOI: 10.1016/S0263-2241(99)00006-8.
37. Acikgoz S., DeJong M.J., Soga K., *Sensing dynamic displacements in masonry rail bridges using 2D digital image correlation*, "Structural Control and Health Monitoring", Vol. 25, No. 8, 2018, DOI: 10.1002/stc.2187.
38. Crabtree Gärden D., Jimenez A., *Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges: Infrared scanning*,



- Close range photogrammetry and Terrestrial laser scanning, "Structural and Fire Engineering", 2018. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1184613&dswid=2346>.*
39. Backs J., Nychka J., Clair C., *Warning systems triggered by trains could reduce collisions with wildlife*, "Ecological Engineering", Vol. 106, Part A, 2017, 563–569, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.024.
  40. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane..
  41. Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynierskich Id-2 (D2). Warszawa 2005.
  42. Instrukcja o utrzymaniu kolejowych obiektów inżynierskich Id-16 (D83). Warszawa 2005.

## The Use of Rolling Stock as a Carrier of Sensors in the Field of Environmental Monitoring

**Abstract:** The development of the IoT market in Poland may become a factor that propagates the monitoring of the natural environment and increases the automation of it. Measurements performed currently either using low-resolution images (satellite data) or locally (in situ) are burdened with errors due to insufficient data detail or low time resolutions. Often, measurement campaigns are time-consuming and generate high costs. For many years, both in Europe and North America, research has been carried out to enable the use of sensors located on railway mobile platforms (locomotives, carriages) in environmental monitoring. The publication presents the possibility of implementing acoustic and image sensors as well as laser scanning. We present examples of applications and answer the question about the possibility of their implementation in Poland.

**Keywords:** IoT, environmental monitoring, edge device, railway transport, LoRaWAN

### Jan Kotlarz

jan.kotlarz@it-pkp.pl

Odpowiedzialny za obszar przewozów towarowych. Studiuję astronomię na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2012 roku. pracuje w Zakładzie Teledetekcji Instytutu Lotnictwa. W 2009 r. został nominowany do nagrody Travelery przez National Geographic w kategorii naukowe osiągnięcie roku za stworzenie algorytmu generującego trójwymiarowe modele powierzchni Marsa na podstawie analiz topologicznych. Od 2013 r. kieruje projektem HESOFF. Architekt IT w PKP Informatyka sp. z o.o.



### mgr inż. Maciej Szypulski

maciej.szypulski@it-pkp.pl

Nazywam się Maciej Szypulski. W 2017 r. ukończyłem studia magisterskie na kierunku mechatronika. Temat mojej pracy magisterskiej to „Projekt i technologia kondensatorów grzebieniowych wykonanych z miedzi”. Obecnie jestem słuchaczem studiów doktoranckich na kierunku elektrotechnika na Wydziale Elektroniki i Informatyki na Politechnice Lubelskiej. Moje zainteresowania naukowe to systemy mikroelektromechaniczne (MEMS), technologie cienkowarstwowe, technologie półprzewodnikowe i bioelektronika.



### dr Katarzyna Kubiak

katarzyna.kubiak@ilot.edu.pl

Absolwentka kierunku Biologia w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie oraz kierunku Ochrona Środowiska na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2015 r. pracownik Zakładu Teledetekcji w Instytucie Lotnictwa w Warszawie. Główne zainteresowania naukowe to optymalizacja konfiguracji sensorów optycznych kamer wielospektralnych do obrazowania biomasy oraz elementów przyrodniczych.



### dr inż. Jarosław Siwiński

jaroslaw.siwinski@wat.edu.pl

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (2009 r.). Otrzymał stopień naukowy doktora (mechanika konstrukcji) w 2014 r. w Wojskowej Akademii Technicznej. Aktualnie jest zastępcą kierownika Katedry Budownictwa Ogólnego i Infrastruktury Wojskowej Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji. Jego zainteresowaniami naukowymi są: mechanika konstrukcji budynków, analizy numeryczne, analizy zniszczenia, konstrukcje żelbetowe i specjalne. Jest autorem licznych publikacji w obszarze analizy budynków, mechaniki konstrukcji, komputerowych metod w procesie projektowania oraz technologii materiałowych.

