

dr hab. inż. Piotr Boguś
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”
Gdański Uniwersytet Medyczny
dr inż. Rafał Grzeszczyk
Automex Sp. z o.o. Gdańsk

Wykrywanie i detekcja stanu pojazdu szynowego z użyciem GPS oraz innych pokładowych urządzeń rejestrujących

Artykuł przedstawia możliwości wykrywania i detekcji stanu pojazdu szynowego bazując na sygnałach zarejestrowanych przez pokładowe urządzenia ORD, takie jak GPS, akcelerometry i czujniki żyroskopowe MEMS. Szczególnym przedmiotem zainteresowań są tzw. sytuacje krytyczne, które mogą się pojawić podczas ruchu pojazdu szynowego. Jako sytuację krytyczną będziemy rozumieli, w ogólności, każdą sytuację w której dojdzie do zaburzeń pracy silnika, przekroczenia prędkości i przyspieszeń, nadmiernych nachyleń itp. Sygnały pozyskane z urządzeń ORD będą dalej podlegać analizie z wykorzystaniem metod przetwarzania sygnałów oraz wyspecjalizowanych algorytmów bazujących na sztucznej inteligencji. (Artykuł powstał w ramach projektu badawczego KBN nr N509 047 32/3308 pt. „Wykrywanie sytuacji krytycznych w transporcie kolejowym z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do przetwarzania parametrów ruchu”)

1. Wstęp

Tabor kolejowy zapewnia tani, ekonomiczny i ekologiczny transport dóbr i ludzi, stąd też jego rola znacznie wzrosła w ostatnich latach. Transport kolejowy pełni i tym bardziej będzie pełnił w przyszłości ważny i rozwijający się środek transportu w wielu krajach. Dla zapewnienia nowych wyzwań jakie stoją przed tym środkiem transportu nowoczesna kolej potrzebuje nowoczesnego zarządzania dla usprawnienia bezpieczeństwa, komfortu oraz niezawodności.

Wykrywanie i rejestracja sytuacji krytycznych będzie istotnym składnikiem nowoczesnego systemu zarządzania ruchem kolejowym. Przez krytyczny incydent kolejowy będziemy rozumieli incydent, podczas ruchu pojazdu kolejowego, który może prowadzić do uszkodzenia, awarii, wypadku lub innej ryzykownej sytuacji. Sytuacjami takimi mogą być kolizja pojazdów szynowych, kolizja pojazdu szynowego z przeszkodą lub wykolejenie się prowadzące do śmierci, kalectwa lub zranienia pasażerów, zniszczenia przewożonych dóbr lub zniszczenia środowiska naturalnego na skutek wydostania się na zewnątrz przewożonych szkodliwych substancji. Wypadki te mogą być powodowane przez nadmierną szybkość pojazdu szynowego, niedostosowanie prędkości do warunków torowych, uszkodzenie hamulców oraz inne uszkodzenia zarówno lokomotywy jak i wagonów. Oczywiście część z nich może być wynikiem błędnych działań człowieka. Ryzyka takich incydentów powinno

być określone na podstawie znajomości bieżącego stanu pojazdu oraz symptomów i danych niosących informację na temat uszkodzeń silnika, wycieków, wibracji, prędkości, pozycji geograficznej i odpowiadającej jej warunków torowych itp. [32, 36].

W praktyce wykrywanie sytuacji krytycznych wymaga zestawu urządzeń rejestrujących, które powinny być odpowiednio rozmieszczone w danym pojeździe. Ogólnie ten typ urządzeń bywa nazywany urządzeniami ORD (ang. On-Board Recording Devices), czyli pokładowymi urządzeniami rejestrującymi. Ten typ urządzeń jest stosowany w wielu środkach transportu, najbardziej znane w tym zakresie jest użycie tzw. czarnych skrzynek.

Stan pojazdu powinien zostać określony na podstawie zbioru sygnałów z zarejestrowanych przez takie urządzenia ORD, jak akcelerometry, żyroskopowe MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems) czujniki położenia kąтового oraz odbiorniki GPS (ang. Global Positioning System). Warto podkreślić, że akcelerometry mogą być wykorzystane zarówno do rejestracji trajektorii i prędkości ruchu, jak również do rejestracji sygnałów wibroakustycznych służących do oceny stanu silnika oraz innych elementów lokomotywy lub wagonów. Z kolei użycie technologii GPS w tym zakresie jest interesujące nie tylko dlatego, że daje możliwość określenia pozycji geograficznej pojazdu, ale również jego prędkości [34]. Wpraw-

dzie prędkość obiektu można z reguły wyznaczyć na podstawie typowych urządzeń ORD, np. akcelerometrów lub żyroskopów, jednak taki pomiar jest niedokładny (ograniczona dokładność i stabilność systemów nawigacji inercyjnej - błąd nieuchronnie narasta z upływem czasu, od klasy zastosowanych czujników zależy tylko szybkość i wielkość tych zmian) i wykorzystanie w tym zakresie odbiorników GPS jest zdecydowanie lepszym rozwiązaniem, gdyż pozwala w znacznym stopniu wyeliminować ten problem.

Po zarejestrowaniu określonych sygnałów trzeba dokonać ich analizy i na tym etapie do klasyfikacji i identyfikacji możliwe jest zastosowanie szerokiego zakresu metod przetwarzania sygnałów, w tym, metod bazujących na sztucznej inteligencji. Szczególnie w zakresie analizy sygnałów wibroakustycznych istnieje możliwość zastosowania wielu wyrafinowanych metod obliczeniowych.

2. Pokładowa rejestracja i analiza sygnałów reprezentujących stan pojazdu

Urządzenia ORD są zazwyczaj kojarzone z tzw. "czarnymi skrzynkami". Nazwa "czarna skrzynka" wywodzi się historycznie z czasów gdy urządzenie rejestrujące było umieszczone w solidnej, odpornej na zniszczenie skrzynce koloru czarnego. Obecnie skrzynki te nie są już czarne, zazwyczaj są czerwone lub mają inny, jaskrawy kolor. Współczesne czarne skrzynki kojarzy się z pokładowymi urządzeniami rejestrującymi ORD (ang. On-Board Recording Devices) nazywanymi też urządzeniami rejestrującymi wypadki EDR (ang. Event Data Recorder). Jak dotąd tego typu urządzenia były głównie rozwijane w lotnictwie oraz przemyśle samochodowym, ale w ostatnich latach wzrasta zainteresowanie zastosowaniem ich w transporcie kolejowym.

Nowoczesne pojazdy samochodowe zawierają w sobie wiele rodzajów urządzeń ORD. Najstarszym takim urządzeniem jest tachograf. Współczesne samochody zawierają dużo więcej takich urządzeń, są to np. rejestratory jazdy (ang. trip recorders), elektroniczne systemy sterowania silnikiem, systemy antypoślizgowe, radarowe systemy ostrzegania przed kolizją itp. [26].

Głównym zadaniem typowego systemu ORD jest rejestracja trajektorii po której porusza się pojazd oraz jego pozycji w przypadku kolizji, awarii lub wypadku. Dowolny czujnik ORD podlega wpływowi wielu czynników, które powodują, że pomiar jest niedokładny. Dla czujnika lub zespołu czujników traktowanych jako punkty głównym czynnikiem zakłócającym jest lokalizacja i orientacja czujników w odniesieniu do pojazdu, nieliniowość i rozkalibrowanie czujników, szumy i oscylacje pomiarowe (np. zakłócenia wibroakustyczne), czas próbkowania oraz metody filtracji.

Parametry ruchu są zwykle opisywane w globalnym (związanym z torami) lub lokalnym (związanym z pojazdem) układzie odniesienia. Jeśli siły powodujące ruch są opisane w globalnym układzie odniesienia wówczas całkowanie sygnału z akceleratorów daje wprost trajektorię ruchu. Ale pomiary są z reguły przeprowadzane w lokalnym układzie odniesienia. Wzajemne położenie pomiędzy lokalnym i globalnym układem odniesienia zmienia się w czasie. Pod uwagę trzeba też wziąć siłę grawitacji. Gdyby wszystkie czynniki zakłócające pomiar były znane, wówczas odtwarzanie trajektorii byłoby prostą translacją z lokalnego do globalnego układu odniesienia. W rzeczywistości nie mamy pewności co do położenia pojazdu oraz warunków zewnętrznych i pomiary są zawsze obciążone pewnym rozkładem błędów. W rekonstruowaniu trajektorii bierze się pod uwagę algorytmy zarówno dwu jak i trójwymiarowe. Algorytmy trójwymiarowe są szczególnie użyteczne przy rekonstrukcji wypadków podczas których dochodzi do obrotu pojazdu wokół swoich osi (ang. roll-over accidents) [27, 28].

Dla pojazdu szynowego rekonstrukcja historii sytuacji krytycznej wymaga zrekonstruowania trajektorii ruchu w układzie współrzędnych związanych z szynami. Głównymi zadaniami podczas rekonstrukcji niebezpiecznego wydarzenia jest więc wybór:

- parametrów ruchu układu odniesienia
- momentu rejestracji.

Dowolny pojazd w ruchu traktuje się jak ciało sztywne, stąd też pełny opis wymaga określenia jego trzech liniowych i trzech kątowych współrzędnych. Z użyciem pokładowych czujników (akcelerometry i żyroskopy) można określić przyspieszenia liniowe oraz przyspieszenia kątowe.

Standardowy system rejestratorów pokładowych we współczesnym samochodzie daje możliwość odczytywania wielu parametrów ruchu, np. siłę hamowania można otrzymać z systemu kontrolera ABS (ang. Anti-Lock Braking System), pozycję przepustnicy z kontrolera modułu mocy PCM (ang. Power Control Module), skręt koła kierownicy z systemu kontroli trakcji TCS (ang. Traction Control System) itd. Niestety typowy pojazd szynowy nie jest wyposażony w takie urządzenia. Otrzymanie istotnych parametrów ruchu dla pojazdów szynowych wymaga zaopatrzenia pojazdu szynowego w dodatkowe urządzenia rejestrujące. Dużym ułatwieniem w analizie może się tutaj okazać fakt, że pojazdy szynowe poruszają się po ustalonych trajektoriach wyznaczonych przez szyny [27].

Istotnym elementem zaproponowanego kolejowego systemu rejestracji parametrów ruchu jest urządzenie GPS. Warto jednak podkreślić, że typowy GPS nie pracuje w miejscach takich jak tunele oraz obszary pomiędzy wysokimi budynkami i wzgórzami. Z tego względu dopiero połączenie danych uzyskiwanych z

GPS z danymi z układów nawigacji inercyjnej (tj. akcelerometrów i żyroskopów) pozwala na wyznaczenia i estymację pozycji pojazdu w każdych warunkach [29]. Wykorzystanie danych z odbiornika GPS wymaga specjalnego oprogramowania i oprzyrządowania, w praktyce każdy komercyjny odbiornik GPS używa protokołu komunikacji NMEA (ang. National Marine Electronics Association), nie wszystkie jednak komendy NMEA są zwykle zaimplementowane. Zazwyczaj prędkość jest dostępna i niektóre komunikaty NMEA dają kierunek prędkości w stopniach w układzie współrzędnych związanych z ziemią oraz moduł prędkości w km/h lub węzłach. W modzie binarnym NMEA jest dostęp do dodatkowych informacji, różnych w zależności od wytwórcy i typu czujnika np. składowych wektora prędkości w trzech kierunkach (wzdłuż osi południkowej, równoleżnikowej oraz pionowej). Warto podkreślić, że prędkość w systemie GPS nie jest zwykle określana na podstawie ze zmiany pozycji w czasie, ale z wykorzystaniem efektu Dopplera. W ogólności algorytmy stosowane w urządzeniach GPS mogą być różne i korekcji prędkości może być przeprowadzana na różne sposoby.

W przyszłości użycie GPS wydaje się szczególnie interesujące razem z tzw. geograficznymi systemami informacyjnymi GIS (ang. Geographical Information Systems). Systemy GIS są komputerowymi systemami, które pobierają, magazynują, manipulują, wyświetlają i analizują informację geograficzną [35]. Razem z danymi GIS, sygnał GPS pozwala na reprezentowanie i zaznaczanie trasy i pozycji pojazdu na mapie [34]. Taka informacja pozwoli nie tylko na znalezienie na mapie pozycji pojazdu w chwili wypadku lub awarii, ale również może udostępnić natychmiastowo dane na temat np. warunków pogodowych, stanu torowiska, obecności innych pojazdów w pobliżu itp. [18, 41].

3. Inteligentne metody obliczeniowe w wykrywaniu i detekcji stanu pojazdu szynowego

Metody sztucznej inteligencji obejmują szeroki zakres zagadnień, od klasycznej sztucznej inteligencji do metod opisywanych i nazywanych w literaturze jako „soft computing”. Można wśród nich odnaleźć metody rozmyte (bazujące na teorii zbiorów rozmytych), sieci neuronowe, algorytmy genetyczne itp. (patrz np. [16, 19, 22, 31]). Podejście z użyciem szeroko rozumianych metod sztucznej inteligencji staje się coraz bardziej popularne w zakresie transportu, zarówno w zastosowaniach drogowych, jak i również nie drogowych. Przede wszystkim są one stosowane w wykrywaniu, przewidywaniu i rozpoznawaniu wypadków, w sterowaniu i zarządzaniu ruchem oraz w organizacji informacji na temat ruchu kolejowego [17, 38, 39, 40].

Inteligentne systemy organizacji podróży mogłyby sterować systemem kolejowym oraz przygotowy-

wać informacje dla pasażerów. Tego typu systemy są powszechnie rozwijane w obszarze transportu, przede wszystkim publicznego i samochodowego. Najbardziej rozwijane są obecnie inteligentne systemy organizujące ruch pojazdów samochodowych na autostradach [41]. W tym zakresie powstały aplikacje do wykrywania wypadków na autostradach bazujące na rozmytych metodach grupowania danych [33]. Podejście to rozróżniało zależne czasowo wzorce reprezentujące incydenty w ruchu drogowym oraz stany odpowiadające brakowi wypadków. Danymi wejściowymi w takim systemie są gęstość ruchu oraz dane z ulicznych liczników ruchu (ang. lane traffic count).

Metody sztucznej inteligencji zaczęły jednak być stosowane w modelowaniu, przewidywaniu i zapobieganiu wypadków kolejowych [36, 32]. Na przykład praca [32] prezentuje systematyczną analizę wybranych wypadków kolejowych, które wydarzyły się w Wielkiej Brytanii oraz na całym świecie. Praca prezentuje kolejowy system bezpieczeństwa (model RSSMS) dla utrzymania poziomu ryzyka przedsięwzięć kolejowych w akceptowalnym zakresie.

Analiza sygnałów pozyskiwanych przez pokładowe urządzenia rejestrujące okazuje się bardzo skomplikowana i różnorodna. Celem tej analizy jest, przede wszystkim, wykrywanie i zapobieganie sytuacjom krytycznym. Tematyka ta jest bardzo szeroka bowiem zawiera zarówno zagadnienia dotyczące wysoko specjalizowanych technologii rejestracji sygnałów, jak i wyrafinowane algorytmy i oprogramowanie ich obróbki. W tym zakresie wiele metod wywodzących się z szeroko rozumianej sztucznej inteligencji bywa wykorzystywanych z powodzeniem, np. sieci neuronowe, systemu rozumujące na bazie zbiorów rozmytych, algorytmy genetyczne, maszyny wektorów wspierających SVM i inne.

Sygnały pozyskiwane dla różnych stanów pojazdu szynowego oraz jego silnika zwykle różnią się na tyle, że człowiek jest w stanie te sygnały zidentyfikować i wyróżnić. Ten fakt, między innymi, jest podstawową przesłanką do zaproponowania metod sztucznej inteligencji w tym zakresie [23, 24]. Ponadto, w czystym systemie rozpoznawania sytuacji krytycznych nie kładziemy zazwyczaj nacisku na otrzymanie pełnej precyzyjnej trajektorii pojazdu i dokładnej historii zmian jego stanu. Ważniejsze jest znalezienie parametrów, których analiza potrafi przewidzieć potencjalnie niebezpieczne sytuacje. Wydaje się, że wiele metod nauczania pod nadzorem może być użytecznych w tym zakresie. Do tego celu zaproponowano, na przykład, wielowymiarową, jednokierunkową sieć neuronową ze zmodyfikowanym algorytmem wstecznej propagacji błędów [23]. Również metody nauczania bez nadzoru nadają się do podobnych celów. Zastosowanie specjalnych algorytmów grupowania danych dla rozróżnienia stanów pojazdu jest również możliwe i było stosowane [33].

Zazwyczaj przed typową klasyfikacją sygnał podlegają obróbce wstępnej. Co warto podkreślić, sam proces przetwarzania wstępnego można również potraktować, jako pierwszy etap klasyfikacji i rozpoznawania. Wśród metod przetwarzania sygnałów obok klasycznych liniowych technik widmowych można również zastosować metody nieliniowe, czyli metody bazujące na teorii chaosu deterministycznego [1, 3, 8, 13].

Docelowo podstawą rozwoju zaawansowanych inteligentnych systemów zarządzania ruchem powinny stać się efektywne systemy pokładowych urządzeń rejestrujących łączące możliwości GPS oraz GIS. Stworzy to możliwość pełnego opisu stanu pojazdu. Systemy takie są rozwijane w zakresie transportu publicznego oraz samochodowego, a ich zastosowanie do transportu kolejowego wydaje się szczególnie interesujące [24]. Systemy GIS rozpowszechniły się w transporcie na przełomie lat 80 i 90 dwudziestego wieku. Bywają one nazywane systemami GIS-T [35].

Obszar współpracy urządzeń GPS oraz GIS stwarza problemy, które mogą się stać polem dla stosowania wyrafinowanych metod sztucznej inteligencji (np. analiza przestrzenna, reprezentowanie wiedzy geograficznej, nabywanie danych z systemów GIS, analiza i rozpoznawanie stanu pojazdu itp.).

Najważniejszym obecnie obszarem zastosowań GPS w kolejach są pomiary GPS położenia i geometrii torów kolejowych [20, 21]. Jest wiele procedur, które są wykorzystywane do przetwarzania danych GPS dla precyzyjnego określenia pozycji szyn oraz pojazdu szynowego. Między innymi pojawiają się tutaj problemy związane z dopasowaniem lokalnych układów odniesienia [20, 21]. Jest wiele aplikacji praktycznych, które dotyczą sterowania i zarządzania nowoczesnymi pociągami [25]. Najważniejszym zadaniem takich systemów będzie zarządzanie katastrofami (ang. disaster management), w których trzeba natychmiast ustalić pozycję wypadku i uruchomić środki i infrastrukturę dla operacji ratunkowej. Innym ważnym zastosowaniem systemów opartych na GPS może być tzw. zarządzanie i monitorowanie floty pojazdów (ang. fleet monitoring) w dowolnej skali, od obszarów miejskich, podmiejskich do obszaru całego kraju. Systemy takie noszą nazwę systemów lokalizacji pojazdów AVL (ang. Automatic Vehicle Location) gdzie razem z GPS inne technologie są stosowane do określania pozycji i stanu pojazdu. Systemy GPS/GIS mogą być również z powodzeniem stosowane w tworzeniu i odwzorowywaniu map sieci transportowych. System GPS został, między innymi, wykorzystany do zarządzania wypadkami i monitorowania stanu szyn i trakcji kolejowych [29].

Metody sztucznej inteligencji są stosowane w zakresie modelowania, rozumowania, predykcji i przewidywania wypadków kolejowych [32, 36]. Wymaga to prowadzenie systematycznych badań i analizy

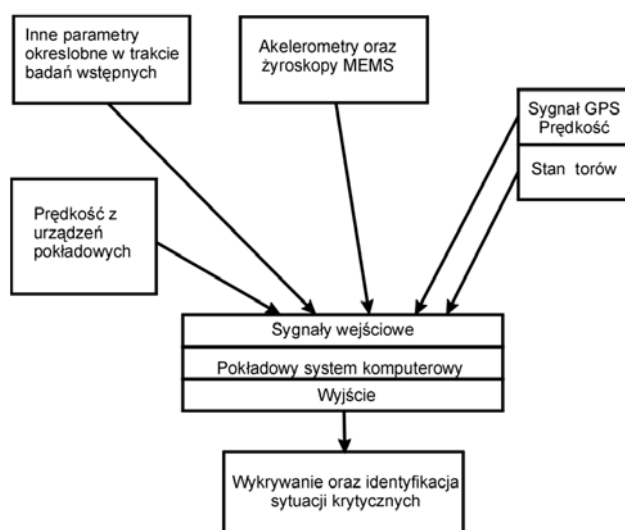
wszystkich występujących wypadków kolejowych [32] i powinno prowadzić do przygotowania modeli kolejowych systemów bezpieczeństwa [32]. Głównym celem takich badań jest utrzymanie ryzyka kolejowych działań na akceptowalnym poziomie. W systemach automatycznej detekcji wypadków AID (ang. Automatic Incident Detection) wykorzystywano systemy decyzyjne Bayesa oraz sztuczne sieci neuronowe.

Podejście w którym dochodzi do połączenia danych otrzymywanych z GPS i GIS nosi czasami nazwę w literaturze jako technika 3G. Skrót ten oznacza integrację 3 rodzajów danych, a mianowicie GPS, GIS oraz najbardziej obecnie popularnego standardu telefonii komórkowej GSM, który zapewnia łączność pomiędzy centrami sterowania, a terminalami bazującymi na GIS oraz jednostkami pokładowymi zaopatrzonymi w urządzenia GPS.

4. Aparatura pomiarowa

Ogólny schemat docelowego systemu ORD jest pokazany na rys. 1. Główne sygnały diagnostyczne są pozyskiwane z czujników przyspieszeń (akcelerometrów), z żyroskopowych czujników typu MEMS (detekcja obrotu) oraz urządzenia GPS (pozycja geograficzna oraz dodatkowo prędkość znajdowana na podstawie specjalnych algorytmów). Dodatkowe sygnały można pobrać ze standardowych urządzeń pokładowych, jeśli są dostępne w czasie pomiaru.

Główne czujniki używane w projekcie są skonstruowane na bazie technologii MEMS. W technologii MEMS używa się specjalnych mikromechanicznych elementów (wymiar mikrometrów), które zawierają struktury trójwymiarowe. Są one realizowane przy użyciu technologii mikroelektronicznej, gdzie mikromechaniczne elementy są nanoszone na podłoże. Najważniejszymi czujnikami produkowanymi w technologii MEMS są akcelerometry i żyroskopy.



Rys.1. Ogólny docelowy schemat pokładowego systemu detekcji oraz identyfikacji sytuacji krytycznych w pojeździe szynowym

Znajdowanie lokalizacji obiektu jest tematyka zasadniczo znana. Jednak w tym temacie, w praktyce, zawsze napotyka się na szereg trudności. Jeśli czujnik, albo zespół trzech czujników, potraktujemy jako obiekt punktowy, głównymi czynnikami, które zaburzają rekonstrukcję trajektorii ruchu pojazdu są:

- pozycja i orientacja czujników w odniesieniu do pojazdu,
- nieliniowości oraz rozkalibrowanie czujników,
- szum pomiarowy oraz oscylacje,
- czas próbkowania,
- metody filtracji.

W projekcie wykorzystano czujniki GPS typu Garmin GPS16. Są to nowoczesne czujniki GPS, które dają możliwość wypracowania bardziej dokładnych współrzędnych pozycji wykorzystując korekcje różnicowe w standardzie RTCM SC-104. Różnicowe dane GPS dla technologii DGPS lub RTK potrzebują danych z czujników w czasie rzeczywistym, tak aby rezultaty były dostępne podczas pomiarów. Innym podejściem mogłoby być przetwarzanie wtórne "off-line" zebranych danych i wówczas bezpośrednio połączenie danych pomiędzy pomiarami byłoby niepotrzebne. Podejście takie jest często stosowane w geodezji i miernictwie lądowym.

Obecnie jednak, w związku z tym, że techniki bezprzewodowej komunikacji stały się tanie i łatwo dostępne, coraz więcej technik opartych na GPS jest stosowanych. Najprościej jest dostarczyć dane przez Internet w uniwersalnie akceptowanych protokołach używając serwisu danych TCP/IP i UDP (np. NTRIP, GNSS Internet Radio). Niektóre projekty tego rodzaju są dotowane przez Unię Europejską i kraje członkowskie są zobowiązane do rozwijania i publicznego udostępniania strumieni danych DGPS/RTK dla zainteresowanych. Przewidywane zastosowanie obejmuje szeroki zakres działań, od geodezji do nawigacji w czasie rzeczywistym w pojazdach i okrętach. Nie wszystkie projekty w tym zakresie zostały ukończone w założonych terminach, ale prędzej, czy później strumienie danych w Europie staną się szeroko dostępne. Różne dane z różnych stacji odniesienia w całej Europie będą mogły być pozyskane używając dowolnych urządzeń zdolnych do komórkowego połączenia z Internetem, takich jak telefony i modemy wyposażone w GPRS, UMTS, EDGE i HSDPA.

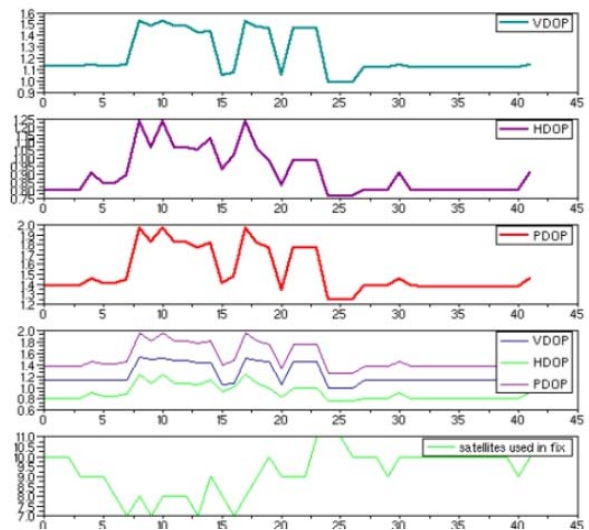
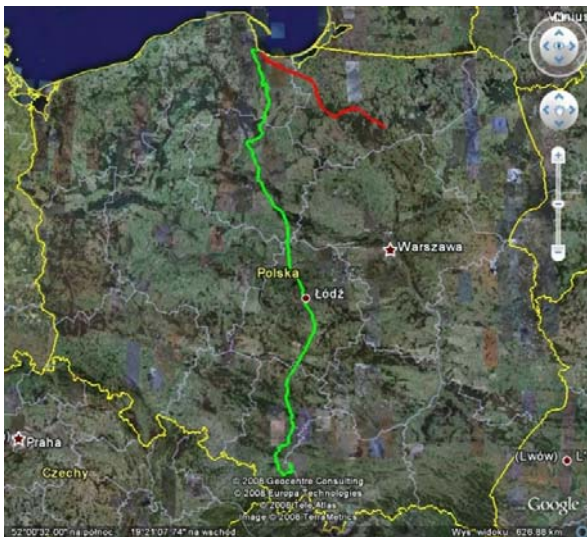
W nowoczesnym przemyśle transportowym, gdy decydujące dla powodzenia operacji biznesowych staje się bezpieczne dostarczenie transportowanych wartościowych dóbr na czas, pojawia się potrzeba śledzenia i monitorowania. Proste śledzące aplikacje mogą być implementowane używając nowoczesnych modemów, które są często zaopatrzone w wbudowane interpretery skryptów, takie jak Python lub Java aby pozwolić użytkownikowi dodawać swoje własne działania bez zewnętrznych wyspecjalizowanych mikrokontrolerów. Pierwsze testy zostały przeprowadzone z

modułem Telit GM862-GPS wraz z zestawem testującym EVK2. Jednostka ma wbudowany odbiornik GPS, modem GSM (ang. Global System for Mobile Communications) w technologii GPRS (General Packet Radio Service) oraz interpreter skryptu Python. Zawiera on jedynie 10-bitowe analogowe wejście oraz kilka ogólnego przeznaczenia linii wejścia/wyjścia, które mogą być dostępne i użyte z aplikacji użytkownika. Moc obliczeniowa jednostki nie jest zbyt wielka, ale wystarczająca do prostego śledzenia, otrzymywania, przetwarzania i odpowiadania na wiadomości tekstowe, e-maile oraz transmisję danych przez GPRS (protokoły TCP/IP i UDP). Jednostka wnosi poprawki do nabytych informacji, takich jak położenie (z wewnętrznego czujnika GPS), sygnały binarne dla temperatury, ciśnienia, poziomów itp. (jeśli odpowiednie czujniki są podłączone). Proste aplety zostały stworzone dla testowania przydatności do śledzenia pojazdu i zdalnej diagnostyki. Dla przykładu, zebrana informacja (lokalizacja, prędkość, nagłówki z czujnika GPS oraz inne dane diagnostyczne) jest wysyłana w postaci wiadomości tekstowej, w odpowiedzi na SMS zawierający hasło i jedną z dostępnych komend. Rozwiązanie z użyciem SMS nie jest rozwiązaniem optymalnym dla każdej aplikacji, stąd inne środki dostępnej komunikacji takie jak protokoły SMTP/POP3, TCP/IP, UDP również powinny być wypróbowane.

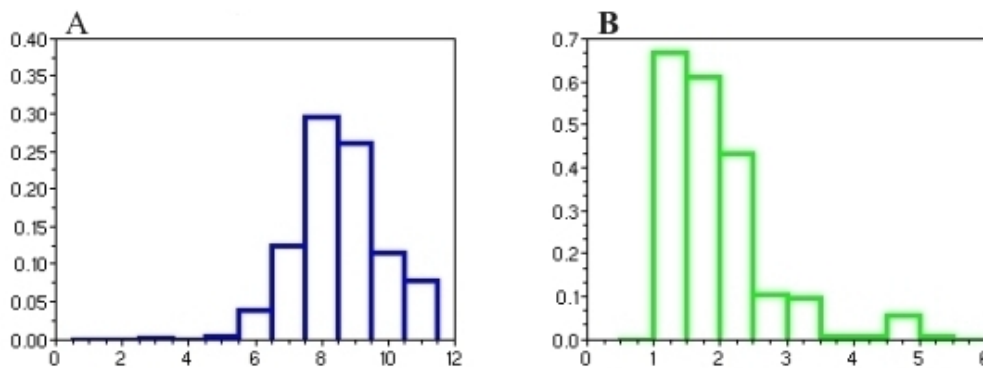
Innym podejściem do zminimalizowania pewnych wrodzonych ograniczeń technologii GPS jest integracja sygnałów z czujników inercyjnych, żyroskopów i akcelerometrów. Dla fuzji wskazań czujników trzeba zastosować mikroprocesor o względnie dużej mocy obliczeniowej. Do tego celu wybrano platformę sprzętową opartą na rdzeniu Atmel-AVR32. Jednostka centralna bazuje na zestawie uruchomieniowym ATVK1100, który pobiera dane z różnych czujników rejestrujących kątowe i liniowe prędkości i przetwarza je w porównaniu z danymi z jednym lub więcej czujników GPS. Różna natura sygnałów oraz całkowicie odmienne charakterystyki probabilistyczne błędów zniekształceń odpowiadających kanałom pomiarowym, wymagają specjalnych metod obliczeniowych. W tym zakresie najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie filtrów Kalmana.

Innym interesującym podejściem jest zastosowanie macierzy czujników GPS (co najmniej dwóch lub trzech) do wyznaczenia orientacji obiektu w przestrzeni z wykorzystaniem techniki różnicowej odmiany nawigacji satelitarnej DGPS (ang. differential global positioning system).

Rys. 2 i 3 pokazują przykładowy wynik prób urządzenia GPS podczas przejazdu na trasie Gdańsk – Bielsko-Biała [12, 14, 15]. Na rys. 2 i 3 podano parametry, które są najczęściej wykorzystywane w typowym pomiarze GP. Jest to tzw. obniżenie precyzji DOP (Dilution Of Precision) lub GDOP (Geometric Dilution of Precision), czyli zestaw parametrów opisu-



Rys. 2. Zarejestrowana trasa drogową (Gdańsk – Bielsko-Biała, zielona linia) oraz fragmenty wykresów rejestrowanych parametrów opisujących dokładność pozycji (VDOP, HDOP, PDOP – pionowa, horyzontalna, pozycyjna dokładność pozycji oraz liczba satelitów)



Rys. 3. Przykładowe znormalizowane histogramy uzyskane dla rejestracji z rys. 2 (A – liczba satelitów, B – osłabienie precyzji określenia pozycji)

jącego wpływ geometrii konstelacji satelitów na wyznaczenie pozycji w systemie GPS. DOP to termin dotyczący GOS używany w inżynierii geomatycznej (geoinformatycznej) aby opisać geometryczną siłę konfiguracji satelitów na dokładność GPS. Gdy widziane satelity są blisko siebie na niebie, geometria jest uważana za słabą i wartość DOP jest wysoka. Gdy są daleko od siebie geometria jest silna i wartość DOP jest niska. Niska DOP reprezentuje lepszą dokładność pozycjonowania GPS z powodu szerszej kątowej separacji pomiędzy satelitami używanymi do obliczania pozycji. Czynniki, które mogą zakłócić DOP są, oprócz orbit satelitów, przeszkody które mogą uniemożliwić wykorzystanie pewnych satelitów w pewnych obszarach (pomiar w obszarach zurbanizowanych). Rozróżnia następujące rodzaje DOP:

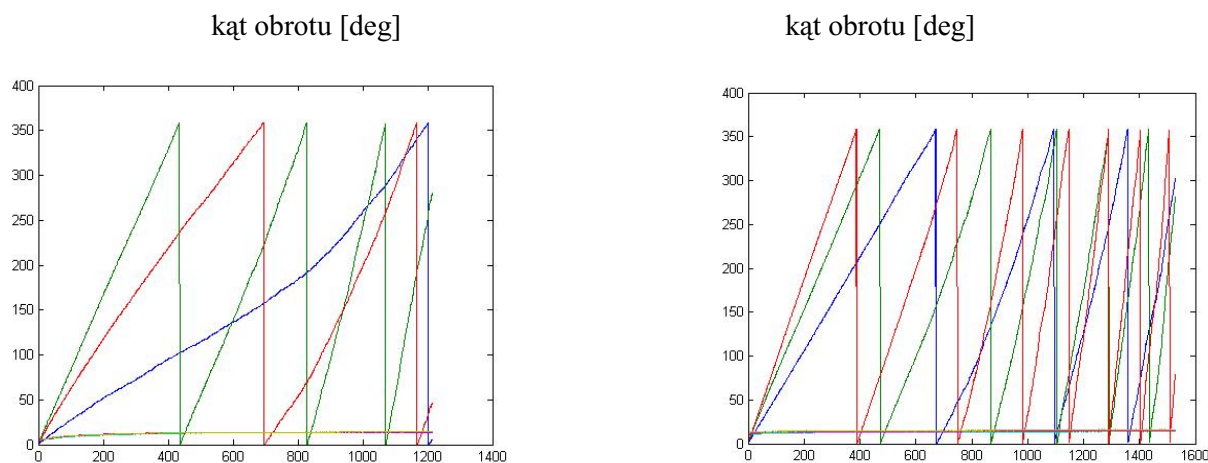
- GDOP – parametr geometryczny opisujący dokładność położenia punktu w 3 wymiarach (geometryczne),
- HDOP – dla współrzędnych płaskich (horyzontalne)
- VDOP – dla wysokości (pionowy)

- TDOP – dla pomiaru czasu (czasowe)
- PDOP – współczynnik opisujący stosunek między błędem pozycji użytkownika a błędem pozycji satelity (pozycja) .

Wartość któregoś z parametrów równa 0 oznacza, że w dane chwili pomiar pozycji jest niemożliwy ze względu na zakłócenia, słaby sygnał z satelitów, zbyt małą ilość widocznych satelitów itp. Im mniejsza jest wartość tego parametru (ale większa od zera) tym pomiar jest dokładniejszy. Przyjmuje się następujące umowne opisy jakości sygnału w zależności od wartości jego DOP:

- 1 idealny
- 2 – 3 znakomity
- 4 – 6 dobry
- 7 – 8 umiarkowany
- 9 – 20 słaby
- > 20 zły

Powyższe wielkości oblicza się z pozycji używanych satelitów na lokalnym niebie. Odbiorniki GPS pozwalają na wyświetlenie tych pozycji jak również wartości DOP.



Rys. 4. Zależność odczytu położenia nieruchomego układu żyroskopów

Warto zwrócić uwagę, że sygnały z żyroskopu półprzewodnikowego są bezużyteczne do odtwarzania trajektorii ruchu pojazdów bez zastosowania dedykowanych algorytmów kompensujących dryft i podatność na wpływ temperatury. Na rys. 4 wykresach przedstawiono zależność odczytu położenia nieruchomego układu zbudowanego z trzech żyroskopów ADIS16255. W zależności od temperatury układu, w różnych położeniach, po okresie kilkuset sekund (ok. 400 - 1200 w przedstawionym przypadku) scałkowane przesunięcie osiąga wartość pełnego obrotu o 360° [12, 14, 15].

5. Klasyfikacja stanów silnika spalinowego przy użyciu metod sztucznej inteligencji

Na stan pojazdu oprócz jego pozycji, prędkości i przyspieszeń składają się również dane na temat stanu silnika oraz innych urządzeń pojazdu. Stąd też zadaniem każdego systemu ORD powinno być również monitorowanie przynajmniej uszkodzeń i zaburzeń w pracy silnika. Eksperymenty, które zostały przeprowadzone w tym zakresie [3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] pokazały na możliwość określenia stanów silnika spalinowego na bazie sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych na korpusie silnika. Dotyczyły one wykrywania stanu trwałego zużycia silnika [10, 11] oraz zjawiska wypadania zapłonu. Sygnały diagnostyczne pozyskiwane z silnika były analizowane przy użyciu następujących metod:

- obliczanie globalnych statystycznych parametrów takich jak średnia, mediana, odchylenie standardowe itp. [10, 11],
- analiza nieliniowa z wykorzystaniem metod teorii chaosu deterministycznego [1, 3, 5, 8, 13],
- analiza krótkoczasowa [4, 6, 7, 9].

W zakresie wibroakustycznej diagnostyki silnika spalinowego interesujące rezultaty uzyskano wykorzystując nieliniową analizę sygnałów. Pokazano, że maksymalny wykładnik Lapunowa można traktować jako parametr diagnostyczny wykrywający wypadanie

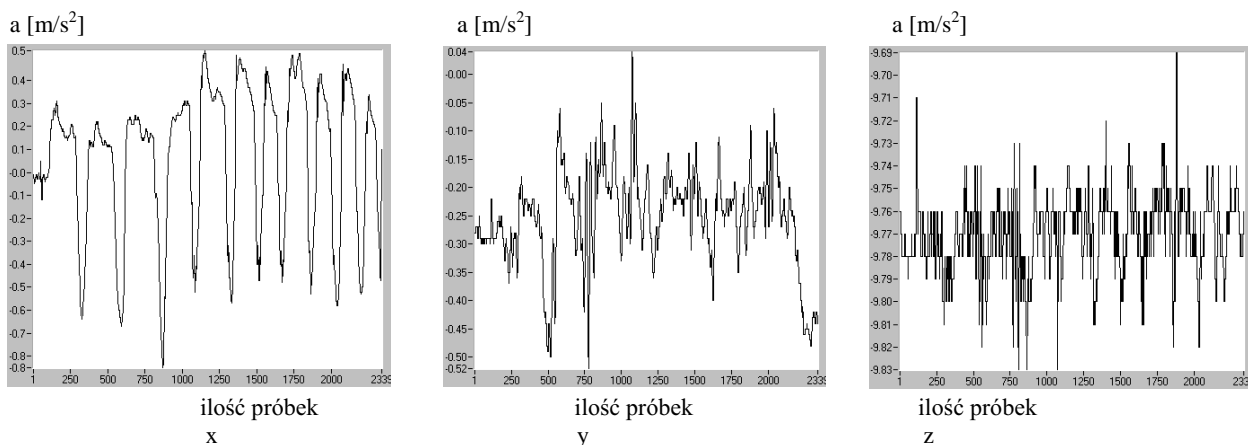
zapłonu [3, 5, 8, 13].

Badania podjęte dotąd w zakresie diagnostyki silników lokomotyw spalinowych objęły między innymi badania w zakresie stanu silnika spalinowego przed i po generalnym remoncie silnika. Badania pokazały, że dla pewne parametry rozróżniają w sposób znaczący stan silnika przed i po remoncie [10, 11]. Rezultaty te były obiecujące, ale niewystarczające dla przeprowadzenia pełnej klasyfikacji. W tym celu zastosowano więc metodę maszyn wektorów wspierających SVM (ang. Support Vector Machines) [2, 37]. Maszyny wektorów wspierających SVM zwane inaczej maszynami z jądrem (ang. kernel machines) można zliczyć do metod uczenia się na bazie danych empirycznych pod nadzorem. Eksperymenty SVM zostały przeprowadzone przy użyciu klasyfikatora SVM Classifier [30]. Wykorzystuje on do klasyfikacji dwa rodzaje SVM: C-SVM i nu-SVM.

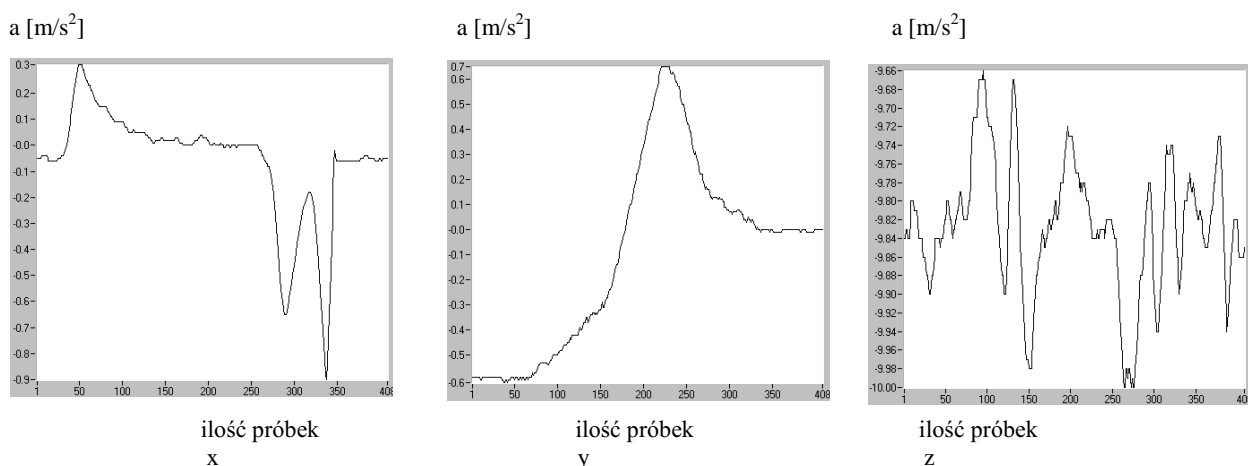
Porównanie różnych algorytmów SVM opierało się na dokładności klasyfikacji (ang. classification accuracy). Pierwsze rezultaty pokazały użyteczność SVM do klasyfikacji stanu silnika. Na bieżącym etapie badań zarówno liniowe jak i radialne jądro pokazało bardzo dobrą efektywność (nawet 100% w niektórych przypadkach), czasami nawet jądro liniowe dało lepszą klasyfikację niż radialne. Pierwsze badania w dalszym ciągu są jednak obciążone pewnymi wadami, przede wszystkim ze względu na stosunkowo małą ilość danych treningowych.

6. Badania pokładowe

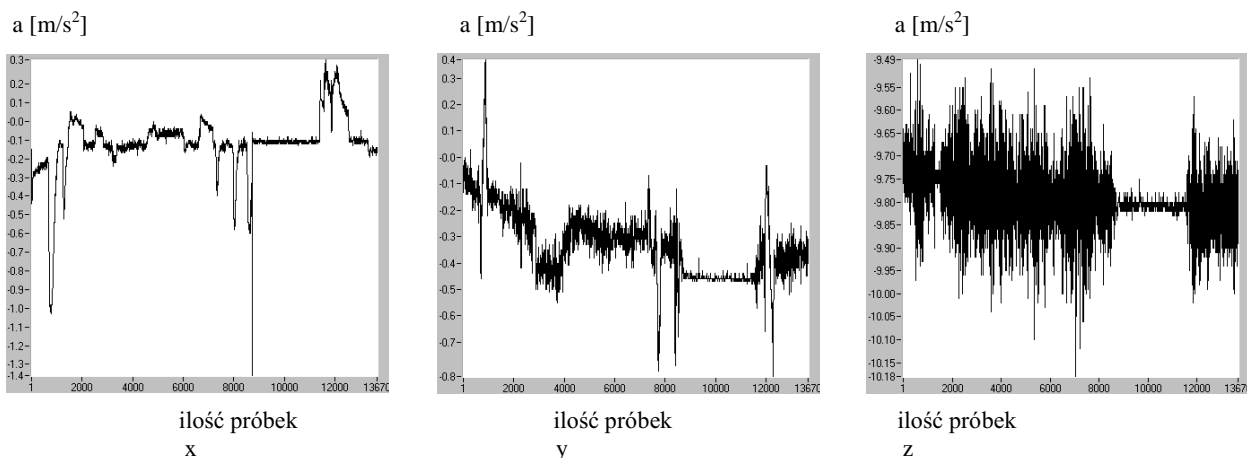
Badania pokładowe przeprowadzone zostały przy zastosowaniu urządzenia do rejestracji, które umożliwia pomiar trzech przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach przestrzennych. Przyrząd ten jest wyposażony w kolorowy wyświetlacz LCD, klawiaturę foliową, niezależne, bateryjne zasilanie i dużą pamięć typu SD/MMC do przechowywania wyników pomiarów. Urządzenie, podobnie jak (wcześniej opisany w niniejszej pracy) prototyp zbudowany



Rys. 5. Przyspieszenia w kierunkach x, y, z dla przejazdu na małej prędkości składu lokomotywy z jednym wagonem na drodze około 0,5 km z naprzemiennym hamowaniem i przyspieszaniem



Rys. 6. Przyspieszenia w kierunkach x, y, z dla przejazdu na małej prędkości lokomotywy na łuku z nachyleniem na drodze 50 m



Rys. 7. Przyspieszenia w kierunkach x, y, z dla fragmentu przejazdu pociągu pociągów pośpiesznych relacji Poznań-Gdynia z widocznym fragmentem postoju na stacji

z zastosowaniem zestawów uruchomieniowych oparte jest na procesorze firmy Atmel AVR32UC3A0512. Urządzenie umożliwia pomiar i gromadzenie rejestracji, oraz ich transmisję do komputera PC przez wbudowany port USB. Do portu szeregowego urządzenia można także podłączyć standardowy odbiornik GPS, urządzenie umożliwia wtedy rejestrację na karcie pamięci masowej wybranych komunikatów w standardzie NMEA, synchronicznie wraz z danymi z czujników inercyjnych.

W ramach testowania przyrządu pomiarowego przeprowadzono pomiary przyspieszeń podczas ruchu składów pociągów i lokomotywy. Badania przeprowadzono zarówno podczas jazdy typowego pociągu pasażerskiego, jak i podczas przetaczania wagonu i przejazdu lokomotywy na rozjazdach. Drugie z tych badań przeprowadzono na terenie Instytutu Pojazdów Szynowych, gdzie prędkości przejazdu są znacznie ograniczone, stąd też badanie to nie reprezentuje do końca rzeczywistych warunków podczas jazdy składu

Wartości przyspieszeń (w m/s) zmierzonych w kierunkach x, y, z dla przejazdu na małej prędkości lokomotywy na łuku z nachyleniem na drodze 50 m pokazanego rys. 5

Tabela 1

| | X | Y | Z |
|------------------------|----------|----------|----------|
| Max | 0.53000 | 0.04000 | -9.69000 |
| Min | -0.85000 | -0.52000 | -9.83000 |
| Wartość średnia | 0.07150 | -0.25264 | -9.76994 |
| Mediana | 0.17000 | -0.24000 | -9.77000 |
| Odchylenie standardowe | 0.31686 | 0.08522 | 0.01728 |
| Wariancja | 0.10040 | 0.00726 | 0.00030 |
| Max – Min | 1,38000 | 0,56000 | 0,14000 |
| Średni błąd kwadratowy | 0.32482 | 0.26662 | 9.76996 |

Wartości przyspieszeń (w m/s) w kierunkach x, y, z dla przejazdu na małej prędkości lokomotywy na łuku z nachyleniem na drodze 50 m

Tabela 2

| | X | Y | Z |
|------------------------|----------|----------|-----------|
| Max | 0.31000 | 0.65000 | -9.66000 |
| Min | -0.90000 | -0.61000 | -10.00000 |
| Wartość średnia | -0.05689 | -0.09843 | -9.82642 |
| Mediana | 0.00000 | 0.00000 | -9.82000 |
| Odchylenie standardowe | 0.20869 | 0.37503 | 0.07033 |
| Wariancja | 0.04355 | 0.14065 | 0.00495 |
| Max – Min | 1.21000 | 1.26000 | 0,34000 |
| Średni błąd kwadratowy | 0.21631 | 0.38773 | 9.82667 |

Wartości podstawowych parametrów przyspieszeń (w m/s) w kierunkach x, y, z dla fragmentu przejazdu pociągu pociągów pociągów relacji Poznań-Gdynia

Tabela 3

| | X | Y | Z |
|------------------------|----------|----------|-----------|
| Max | 0.33000 | 0.37000 | -9.49000 |
| Min | -1.36000 | -0.83000 | -10.18000 |
| Wartość średnia | -0.11756 | -0.33177 | -9.78970 |
| Mediana | -0.11000 | -0.34000 | -9.80000 |
| Odchylenie standardowe | 0.15955 | 0.13283 | 0.06365 |
| Wariancja | 0.02546 | 0.01764 | 0.00405 |
| Max – Min | 1,69000 | 1,2000 | 0,69000 |
| Średni błąd kwadratowy | 0.19818 | 0.35737 | 9.78991 |

z pełnymi prędkościami. Tego typu badania mają być jeszcze przeprowadzone.

Rysunki pokazują 5, 6, 7, pokazują rejestracje przyspieszeń w kierunkach x, y, z dla trzech przypadków pomiarowych. Odpowiadające im wyniki są przedstawione w tabelach 1, 2, 3.

7. Wnioski końcowe

Badania i eksperymenty w dziedzinie zastosowań różnych urządzeń ORD (akcelerometry, żyroskopy MEMS, GPS) ukazały wielką złożoność problematyki badawczej, zarówno na etapie dopasowania i konstrukcji aparatury, jak i analizy pozyskiwanych sygnałów. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji na tym polu wydaje się niezmiernie interesujące, szczególnie na etapie konstrukcji algorytmów specjalistycznego oprogramowania analizującego dane pozyskiwane z urządzeń ORD. Pierwsze próby z zastoso-

waniem np. maszyn wektorów wspierających SVM okazały się obiecujące. Ogólne rezultaty wskazują na przydatność zaproponowanego podejścia w monitorowaniu i wykrywaniu sytuacji krytycznych w zakresie ruchu kolejowego.

Zaprezentowane badania mają na celu zbudowanie urządzenia zapewniającego bezpieczny i bezkolizyjny przejazd pojazdu szynowego na całym przebiegu trasy. Urządzenie powinno informować o prędkości ruchu pociągu na danym odcinku torów oraz porównywać z prędkością maksymalną i zalecaną. Urządzenie powinno określić wszystkie chwile hamowania, maksymalną prędkość na danym odcinku oraz możliwości przyspieszania. Trasa pojazdu powinna być zapisana w mapie cyfrowej, gdzie powinny się znaleźć informacje o dopuszczalnej maksymalnej prędkości w każdym miejscu trasy. Szczególnie chodzi o miejsca gdzie pociąg musi zwolnić. Każde przekroczenie prędkości powinno wywołać alarm. Być

może urządzenie docelowe zostanie wyposażone w środki programowe, które umożliwią zapisanie profilu przejazdu dana trasa przy wzorcowym przejeździe składu kierowanego przez doświadczonego maszynistę. Docelowo przejazd daną trasą powinien być realizowany automatycznie.

Literatura

- [1] H. D. L. Abarbanel: *Analysis of Observed Chaotic Data*, Springer, 1996.
- [2] S. Abe: *Support Vector Machines for Pattern Classification*, Springer-Verlag, 2005.
- [3] P. Boguś, J. Merkisz, R. Grzeszczyk, S. Mazurek: *Nonlinear Analysis of Combustion Engine Vibroacoustic Signals for Misfire Detection*. SAE Technical Paper Series 2003-01-0354.
- [4] P. Boguś, K. Lewandowska: *Short-Time Signal Analysis Using Pattern Recognition Methods*. Lecture Notes in Artificial Intelligence: Artificial Intelligence and Soft Computing, 3070, 2004.
- [5] P. Boguś, J. Merkisz: *Diagnostyka pokładowa silników wysokoprężnych z wykorzystaniem nieliniowych metod analizy sygnałów*. Pojazdy Szynowe, 1/2004.
- [6] P. Boguś, R. Grzeszczyk, J. Merkisz: *Diagnostyka pokładowa silników wysokoprężnych z wykorzystaniem chwilowej analizy sygnałów*. Pojazdy Szynowe, 1/2004.
- [7] P. Boguś, J. Merkisz: *Wykrywanie zjawiska wypadania zapłonu w silniku o zapłonie samoczynnym w oparciu o grupowanie danych w krótkoczasowej analizie sygnałów wibroakustycznych*. Silniki Spalinowe, 4, 2005.
- [8] P. Boguś, J. Merkisz: *Misfire Detection of Locomotive Diesel Engine by Nonlinear Analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 2005.
- [9] P. Boguś, J. Merkisz: *Short Time Analysis of Combustion Engine Vibroacoustic Signals with Using Pattern Recognition Techniques*. SAE Technical Paper Series 2005-01-2529.
- [10] P. Boguś, A. Sienicki, E. Wojciechowska, J. Merkisz: *The comparison of vibroacoustic signals taken from an engine before and after repair*. Combustion Engines, 2007-SC3.
- [11] P. Boguś, A. Sienicki, E. Wojciechowska: *Porównanie stanu silnika lokomotywy spalinowej ST44 przed i po remoncie przy użyciu sygnału wibroakustycznego*. Pojazdy Szynowe, 2/2007.
- [12] P. Boguś, J. Merkisz, S. Mazurek, R. Grzeszczyk: *Application of GPS and other ORD sensors to detection of the vehicle state*. Proceedings of FISITA 2008 World Automotive Congress, 14-19 September, Munich, Germany, 2008.
- [13] P. Boguś, J. Merkisz: *Chaotic Time Series Analysis in Diesel Engine Diagnostic*. Proceedings of the 7th European Conference on Structural Dynamics EURO DYN 2008, 7-9 July 2008, Southampton, United Kingdom, 2008.
- [14] P. Boguś, J. Merkisz, S. Mazurek, R. Grzeszczyk: *Detection Of Critical Situations In Rail Transport Using Ord Motion Parameters*. CD Proceedings of the 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens, Greece, May 28th – 30st, 2008, str. 1-10.
- [15] P. Boguś, J. Merkisz, S. Mazurek: *The Proscpect of Artificial Intelligence Methods in Identification and Prevention of Critical Railway Accidents*. In: L. Rutkowski, R. Tadeusiewicz, L. Zadeh, J. Zurada (eds.). *Computational Intelligence: Methods and Applications*. EXIT, Warsaw 2008, str. 445-453.
- [16] J. Cytowski: *Algorytmy genetyczne. Podstawy i zastosowania*. AOW, Warszawa 1996.
- [17] X. Z. Gao, S. J. Ovaska: *Soft computing methods in motor fault diagnosis*. Applied Soft Computing, 1, 2001.
- [18] F. Hegyi, A. K. Mookerjee: *GIS and GPS based asset management for Road and Railway Transportation Systems in India*. Proceedings of the 6th Annual International Conference – Map India, 2003, 28-30 January, New Delhi, India, 2003.
- [19] J. Hertz, A. Krogh, R. G. Palmer: *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*. WNT, Warszawa, 1993.
- [20] J. Izvoltova: *Evaluation of GPS Measurements of Railway Track Geometric Position*. Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern Europe Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November 11-13, 2004.
- [21] V. Khitha, S. Govil: *GIS in Public Transportation*. Proceedings of the 6th Annual International Conference – Map India 2003, 28-30 January, New Delhi, India, 2003.
- [22] G. J. Klir, B. Yuan: *Fuzzy Sets & Fuzzy Logic. Theory and Applications*. Prentica Hall PTR, 1995.
- [23] Z. Kowalczyk, S. Mazurek, D. Derebecki, Ł. Gwardyński, P. Jarzewicz: *Zastosowanie sztucznej inteligencji do identyfikacji groźnych wypadków samochodowych*. Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej. Nr 4, Seria: Technologie informacyjne, 2006.
- [24] P. Kumar, D. Reddy, V. Singh: *Intelligent transport system using GIS*. Proceedings of the 6th Annual International Conference – Map India 2003, 28-30 January, New Delhi, India, 2003.
- [25] Y. Maki: *A New Train Position Detection System Using GPS*. Railway Technology Avalanche, 9, 53, 2005.
- [26] P. Mening, C. Coverdill: *Transportation Recorders on Commercial Vehicles*. International Symposium on Transportation Recorders, Arlington, Virginia, 1999.
- [27] J. Merkisz, S. Mazurek: *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2002.
- [28] J. Merkisz, P. Boguś, A. Wrona: *Using Signals of Registered Linear and Angular Acceleration to Reconstruct the Trajectory of Vehicle's Movement*. Proceedings of the 9th EAEC International Congress – 16-18 June 2003-Paris „European Automotive Industry Driving Global Changes”, 2003.
- [29] G. Mintsis, S. Basbas, P. Papaioannou, C. Taxiltaris, I. N. Tziavos: *Application of GPS technology in the land transportation system*. European Journal of Operational Research, 152, 2004.
- [30] M. Pirooznia, Y. Deng: *SVM Classifier – a comprehensive java interface for support vector machine classification of microarray data*. BMC

- Bioinformatics*, 7, 2006.
- [31] D. Rutkowska, M. Piliński, L. Rutkowski: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Łódź, 1997.
- [32] J. Santos-Reyes, A. N. Beard, E. A. Smith: *A systemic analysis of railway accidents*. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering*, 219, Part F, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2005.
- [33] J.-B. Sheu: *A fuzzy clustering-based approach to automatic freeway incident detection and characterization*. *Fuzzy Sets and Systems*, 128, 2002.
- [34] A. Theiss, D. C. Yen, C.-Y. Ku: *Global Positioning Systems: an analysis of applications, current development and future implementations*. *Computer Standards & Interfaces*, 27, 2005.
- [35] J. C. Thill: *Geographic information systems for transportation in perspective*. *Transportation Researches Part C*, 8, 2000.
- [36] D. C. Tyrell: *Rail passenger equipment accidents and the evaluation of crashworthiness strategies*. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering*, Vol. 216, Part F, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2002.
- [37] L. Wang (ed.): *Support Vector Machines: Theory and Applications*. Springer-Verlag, 2005.
- [38] J. R. Wootton, A. Garcia-Ortiz: *Intelligent Transportation Systems: A Global Perspective*. *Mathl. Comput. Modellin*, 22, 1985.
- [39] F. Yuan, R. L. Cheu: *Incident detection using support vector machines*. *Transportation Researches Part C*, 11, 2003.
- [40] A. Zilouchian, M. Jamshidi: *Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies*. CRC Press, 2001.
- [41] R. Zito, G. D'Este, M. A. P. Taylor: *Global Positioning System in the time domain: How useful a tool for intelligent vehicle-highway systems?*. *Transp. Res. C*, 3(4), 1995.