

# System monitorowania on-line stanu technicznego infrastruktury i układu biegowego lekkiego pojazdu szynowego

Bartosz Czechyra, Bartosz Firlik

*W referacie przedstawiono ideę pozyskania i wykorzystania informacji diagnostycznej o stanie technicznym kluczowych elementów usprężynowania tramwaju oraz szynowej infrastruktury miejskiej w zakresie podwyższenia bezpieczeństwa eksploatacji miejskiego systemu transportu szynowego. Przedstawiono architekturę systemu monitorowania stanu pojazdu i toru, strukturę systemu pokładowego, zasadę funkcjonowania zintegrowanego systemu diagnostycznego oraz możliwości aplikacyjne. Autorzy zamieścili wnioski płynące z doświadczeń zebranych w czasie eksploatacji nadzorowanej systemu w warunkach poznańskich. W podsumowaniu referatu przedstawiono zakres potencjalnych możliwości wykorzystania gromadzonych informacji z pojazdu do zwiększenia funkcjonalności systemu ITS. Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu z konferencji „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, Poznań – Rosnówko, 19-21.06.2013.*

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 04.10.2013

data akceptacji do druku: 13.01.2014



Dr inż.  
Bartosz Czechyra  
Politechnika Poznańska  
Instytut Silników Spalinowych i Transportu  
Zakład Pojazdów Szynowych  
email@email.pl



Dr inż.  
Bartosz Firlik  
Politechnika Poznańska  
Instytut Silników Spalinowych i Transportu  
Zakład Pojazdów Szynowych  
email@email.pl

## Wprowadzenie

Funkcjonowanie dużych ośrodków miejskich wiąże się nieodłącznie z ułatwieniem mieszkańcom przemieszczania się, niezależnie od powodów wywołujących zaistniałe potrzeby komunikacyjne oraz sposobów pokonywania przestrzeni. Zapewnienie sprawnie działającego transportu publicznego w miastach jest zasadniczym problemem, od którego rozwiązania zależy ich prawidłowe funkcjonowanie. Poprawa bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów – w tym także tramwajów, jest jednym z bardzo ważnych zagadnień w działaniach przedsiębiorstw transportu publicznego. W przypadku tramwajów częste monitorowanie stanu pojazdu i toru ma istotny wpływ na właściwe planowanie i realizację procesu transportowego

oraz obniżenie kosztów utrzymania taboru i infrastruktury. Wiedza o bieżącym stanie technicznym środków transportu i infrastruktury pozwala na lepsze, bardziej efektywne ich wykorzystanie oraz sprawne zarządzaniem składnikami systemu transportowego. Pomimo ewidentnych korzyści płynących z gromadzenia wiedzy na temat intensywności zużywania taboru i infrastruktury torowej systemu monitorowania stanu technicznego wymienionych składników nie są powszechne. Inaczej niż w kolejnictwie nie istnieją przepisy nakazujące wprowadzenie takich systemów do eksploatacji tramwaju. Jedyne systemy pokładowe jakie powszechnie występują na pojazdach są związane ze sterownikami podsystemów elektrycznych tramwajów (zasilanie i sterowanie) i w żaden sposób ich działanie nie dotyczy detekcji i klasyfikacji stanów eksploatacyjnych układów mechanicznych pojazdów. Tymczasem kwestie bezpieczeństwa i ograniczania kosztów eksploatacji systemów transportowych nabierają coraz większego znaczenia. Ma to związek z renesansem komunikacji tramwajowej w Europie i na świecie, co powoduje, że linie tramwajowe wracają do łask, a tramwaje z roku na rok przewożą coraz większą liczbę pasażerów [1].

## Założenia techniczne i funkcjonalne systemów monitorowania

Głównym założeniem budowy systemu monitorowania układu biegowego pojazdu szynowego jest stwierdzenie, że wymuszenie od toru, zmienne w czasie normalnej eksploatacji, może być podstawą wnioskowania o stanie układu biegowego i usprężynowania pojazdu. Prowadzone badania nad

wykorzystaniem wymuszenia operacyjnego do oceny aktywności wibroakustycznej pojazdu dowodzą, że istnieje możliwość kompleksowej oceny stanu poszczególnych elementów układu biegowego w czasie normalnej eksploatacji pojazdu bazując na sygnałach przyspieszeń drgań wybranych elementów konstrukcyjnych pojazdu [2,3].

W związku z powyższym przyjęto następujące założenia metodyczne:

- monitorowanie stanu pojazdu oraz stanu toru realizowane będzie z pozycji pojazdu (jednostka centralna systemu będzie zainstalowana na pojeździe)
- w procesie monitorowania stanu jako podstawowy nośnik informacji wykorzystany będzie sygnał wibroakustyczny (pomiar przyspieszeń drgań)
- badane zjawiska oceniane są wyłącznie jakościowo, monitorowane jest przekroczenie dopuszczalnych poziomów wybranych parametrów drgań,
- system musi być kompatybilny z istniejącymi systemami informatycznymi tramwaju i nie zakłócać ich działania
- architektura systemu powinna być otwarta tak, aby możliwe było rozszerzenie jego funkcjonalności w trakcie użytkowania,
- poszczególne przetworniki stanowią system rozproszony ułatwiający skalowanie systemu w zależności od typu pojazdu,
- diagnostyką pokładową docelowo objęte są wszystkie wózki pojazdu,
- łatwość instalacji i niskie koszty implementacji układu monitorowania.

System spełniający takie wymagania może być zastosowany we wszystkich tramwajach eksploatowanych w całej Polsce, ale i zagranicą. Bazując na wskazanych założeniach oraz doświadczeniu uzyskanym z pro-

wadzonej badań i dyskusji ze specjalistami z MPK Poznań ustalono, że system powinien być przystosowany do monitorowania i jakościowej oceny następujących zjawisk i procesów zachodzących na pojeździe:

- zużycie elementów zawieszenia na I i II stopniu usprężynowania (utrata własności mechanicznych),
- uszkodzenie powierzchni tocznej koła (poligonizacja, płaskie miejsca),
- bieżąca ocena stabilności biegu oraz komfortu jazdy,
- bieżąca ocena bezpieczeństwa przed wykojeniem,
- detekcja wykojenia i innych stanów krytycznych.

Natomiast w zakresie monitorowania intensywności degradacji infrastruktury torowej i detekcji zjawisk niepożądanych system umożliwia detekcję:

- korugacji (zużycie faliste powierzchni tocznej szyn),
- pęknięcia szyn,
- zmiana parametrów geometrycznych toru (przechyłka, wichrowatość itp.),
- lokalna zmiana sztywności podtorza (ugięcie toru),
- jakościowa ocena rozjazdów i krzyżownic,
- jakościowa ocena zużycia toków.

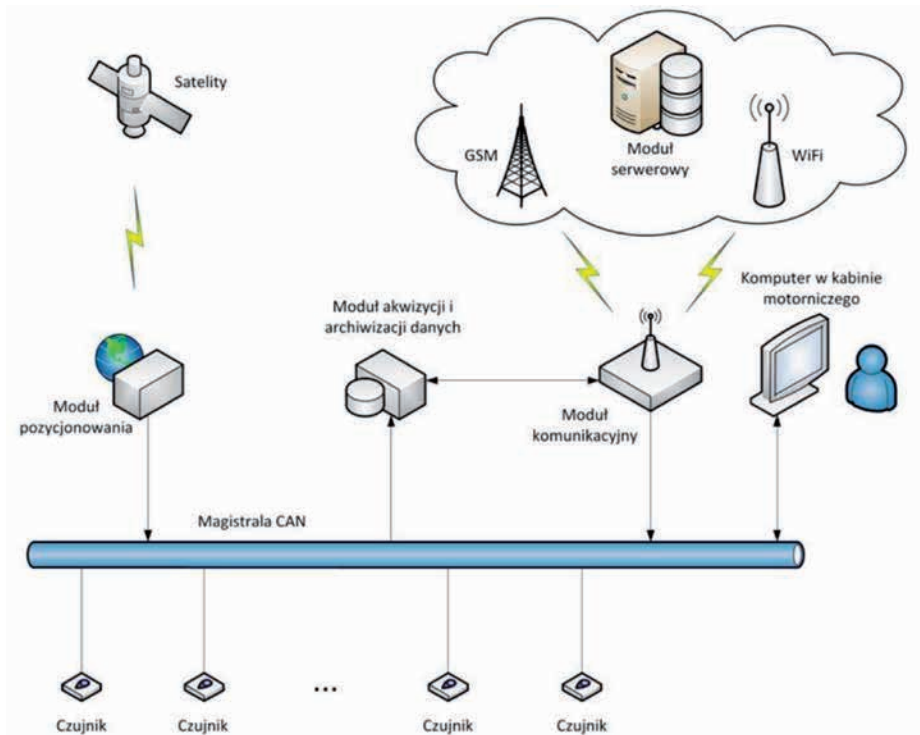
Wymienione powyżej założenia zostały stały się podstawą do przygotowania sprawnej architektury funkcjonalnej systemów monitorowania stanu toru i pojazdu on-line.

## Architektura systemu monitorowania stanu technicznego

Dla obniżenia docelowych kosztów aplikacji przeprowadzono optymalizację sprzętową obu systemów, której efektem jest unifikacja modułów czujników stosowanych w obu systemach oraz zastosowanie wspólnej architektury jednostki akwizycji danych (JAD) Opracowany system monitorowania stanu technicznego toru i układu biegowego lekkiego pojazdu szynowego składa się z przetworników drgań, zintegrowanego przetwornika pogodowego, żyroskopów i inklinometrów oraz odometrów, a także anteny GPS włączonych w magistralę danych, okablowania, JAD wraz z oprogramowaniem, modułu łączności z serwerem (GPRS lub Wi-Fi) oraz serwera systemu wraz z niezbędnym oprogramowaniem. Strukturę systemu schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

Funkcjonalnie system monitorowania podzielony został na następujące podsystemy:

- podsystem pokładowy (umieszczony na pojeździe),
- podsystem serwera i przetwarzania danych (umieszczony na serwerach Poli-



1. Struktura systemu monitorowania wspólna dla obu systemów

techniki Poznańskiej lub serwerze klienta/odbiorcy finalnego),

- podsystem użytkownika (zainstalowany na kilku wybranych komputerach).

Moduły i czujniki wchodzące w skład podsystemu pokładowego zostały połączone za pomocą szeroko stosowanej, wysokoprępkowej magistrali CAN 2.0B. Wykonane elementy systemu zostały dostosowane do konstrukcji mechanicznej oraz pozostałych urządzeń i instalacji elektrycznych tramwajów, w których będą montowane, tak by nie zakłócały ich prawidłowej pracy. Opracowane czujniki zostały przystosowane do montażu na elementach konstrukcyjnych pojazdu (obudowy łożysk kołowych, rama wózka, pudło pojazdu) bez ingerencji w ich

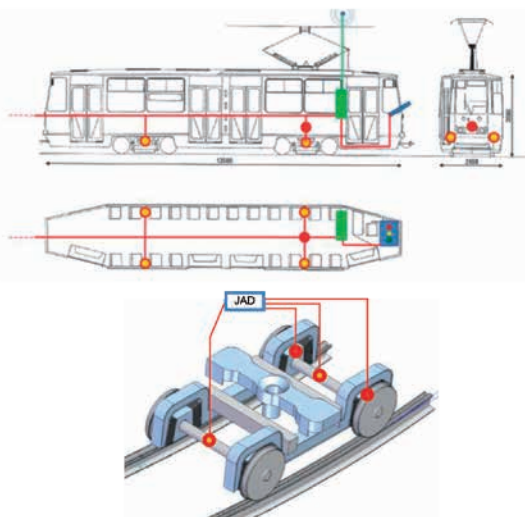
strukturę, w sposób stabilny, pozwalający na realizację funkcji pomiarowych, a także umożliwiającą ich swobodny demontaż w razie konieczności wprowadzenia ewentualnych poprawek podczas trwania testów eksploatacyjnych. Jednostka akwizycji danych oraz moduł łączności zostały przystosowane do montażu w szafce elektrycznej tramwaju. Widok ogólny drugiej generacji prototypu podsystemu pokładowego przed montażem na pojeździe przedstawiono na rysunku 2.

Zaplanowane i przeprowadzone testy laboratoryjne systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego, pozwoliły na wyznaczenie amplitudowo-częstotliwościowych charakterystyk drga-



2. Widok ogólny prototypu systemu monitorowania stanu technicznego pojazdu





**3. Widok pojazdu badawczego z lokalizacją punktów pomiarowych**

niowych modułów przetworników drgań. W toku prowadzonych badań określono czułości wykonanych modułów przetwornikowych oraz potwierdzono ich przydatność do prowadzenia monitorowania stanu technicznego toru i układu biegowego pojazdu.

### Implementacja systemu w MPK Poznań

W celu przeprowadzenia badań eksploatacyjnych zainstalowano system monitorowania stanu infrastruktury torowej oraz monitorowania stanu układu biegowego na dwuwagonowym tramwaju typu Moderus Alfa numer inwentarzowy 88-89. Wygląd pojazdu badawczego oraz schematyczne rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.

Zasilanie Jednostki Akwizycji Danych (JAD) oraz przetworników pomiarowych pochodziło z wewnętrznej instalacji 24V DC, buforowanej przez zestaw akumulatorowy, stanowiący wyposażenie pojazdu szynowego.

Przetworniki przyspieszeń drgań zostały

rozlokowane w punktach pomiarowych wyznaczonych symulacyjnie w oparciu o modele numeryczne tramwajów (modele MBS) w następujących miejscach:

- rama wózka, strona lewa (RWL),
- rama wózka, strona prawa (RWP),
- pudło pojazdu, nad pierwszym wózkiem (PP),
- obudowy łożysk atakującego zestawu kołowego.

W systemie umieszczono również dodatkowy moduł pozycjonowania pojazdu, oparty o indukcyjny licznik obrotów koła tramwajowego (nawigacja zliczeniowa typu „dead reckoning”).

Jednostka Akwizycji Danych została umieszczona w kabinie motorniczego, w obudowie mechanizmu otwierania drzwi, umożliwiając bezproblemowe podłączenie się do instalacji elektrycznej pojazdu. Lokalizacja ta umożliwia również sprawowanie nadzoru nad pracą JAD bez potrzeby ingerencji w instalację tramwaju. Antena GPS została zamontowana na dachu pojazdu,

z wykorzystaniem istniejących przepustów.

Na tramwaju typu Moderus Alfa system jest użytkowany od czerwca 2012 roku. W czasie całego okresu trwania testów tramwaj jest eksploatowany w normalnym ruchu liniowym z pasażerami. Ze względu na liczne, trwające w mieście Poznaniu remonty, linie tramwajowe zmieniały swoje trasy, dzięki czemu badany obszar uległ rozszerzeniu w stosunku do pojedynczej trasy jednej linii. Tramwaj pomiarowy przejeżdżał średnio ok. 3500 km miesięcznie, co pozwoliło na zebranie znacznej ilości danych pomiarowych.

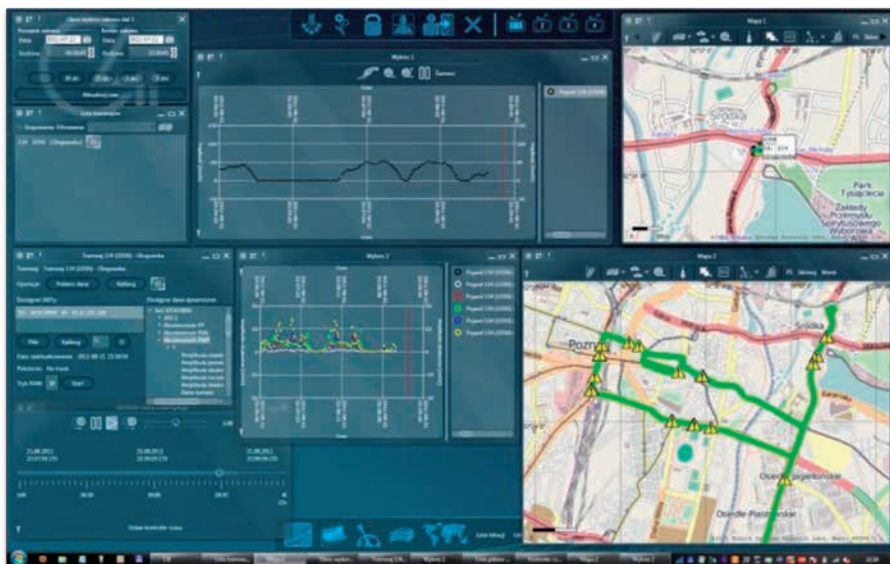
### Przykładowe efekty monitorowania stanu technicznego toru i pojazdu

Pierwszym efektem działania systemu monitorowania stanu technicznego toru była inwentaryzacja jakości infrastruktury torowej na wybranych sekcjach poznańskiej sieci tramwajowej. Ponieważ opracowanie, przyjęcie i weryfikacja standardów jakości torów oraz jej utrzymania jest wewnętrzną sprawą organizatora transportu miejskiego to brak jest ogólnych wytycznych co do wartości krytycznych przyspieszeń drgań rejestrowanych podczas jazdy. Dlatego opracowano procedurę adaptacyjnej detekcji miejsc na torach, które wymagają natychmiastowej interwencji służb torowych. Jednocześnie zadbano, żeby kryterium określania miejsc najbardziej niebezpiecznych z punktu widzenia rejestrowanych wymuszeń od toru uwzględniało również preferencje jakości przewozów ustalanych indywidualnie przez zleceniodawcę usług transportowych.

Wszystkie zebrane dane mogą być wizualizowane w aplikacji użytkownika. Jest to w pełni konfigurowalne środowisko typu C4i, które w sposób syntetyczny integruje bardzo zaawansowane funkcje administracyjne systemu z graficznymi możliwościami przedstawiania danych. Przykładowy ekran omawianej aplikacji przedstawiono na rysunku 4.

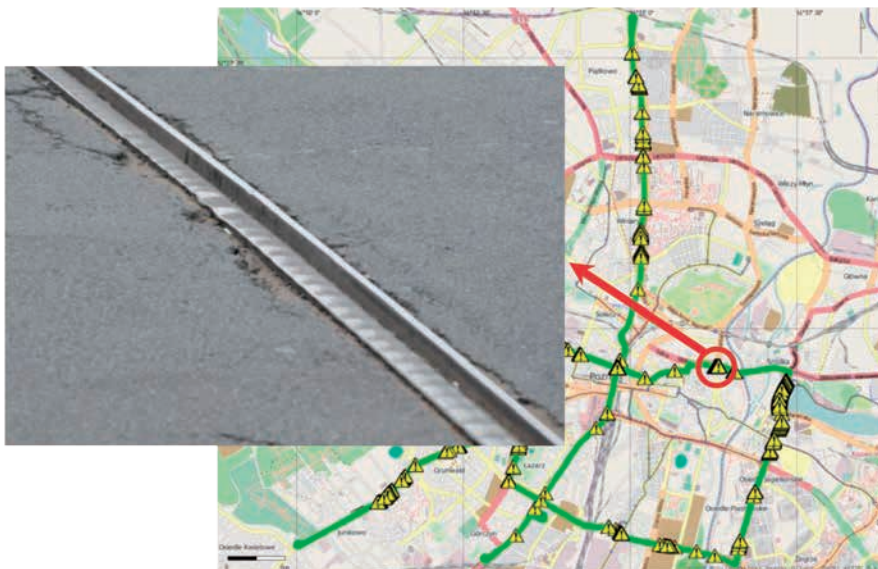
Na rysunku 4 widać typowe wykresy, które pozwalają na obserwację danych zbieranych przez system pokładowy w funkcji czasu lub drogi względnej. Jednocześnie te same dane mogą być wizualizowane i oceniane w funkcji kilku zmiennych (tj. chwilowa prędkość jazdy, bezwzględne położenie geograficzne, zdefiniowany wcześniej obszar/sekcja infrastruktury, itp.) z bezpośrednim naniesieniem wyników analiz na mapę i zaznaczeniem punktów krytycznych (trójkąty ostrzegawcze).

Najczytelniejszym przykładem efektów monitorowania stanu infrastruktury torowej jest detekcja miejsc o najwyższym stopniu dynamicznego oddziaływania na pojazd.



**4. Widok aplikacji użytkownika z przykładowymi danymi pomiarowymi**





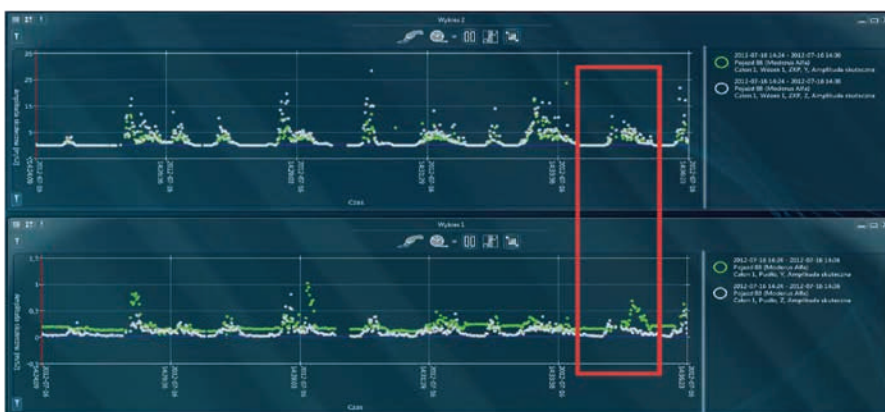
5. Rozpoznane zużycie faliste szyn (korugacja) na Małych Garbarach w Poznaniu



6. Nieciągłości kolejnych sekcji szyn w ciągu ulicy Dąbrowskiego

Bazując na wielokrotnych przejazdach „tramwaju pomiarowego” przez te same sekcje torowe uzyskane dane można było poddać wiarygodnej analizie statystycznej. Dla weryfikacji poprawności funkcyj-

wania systemu dokonano oględzin miejsc wskazanych przez system jako najbardziej niebezpieczne. Przykładowe wyniki weryfikacji przeprowadzonych analiz wskazano na rysunku 5 i 6.



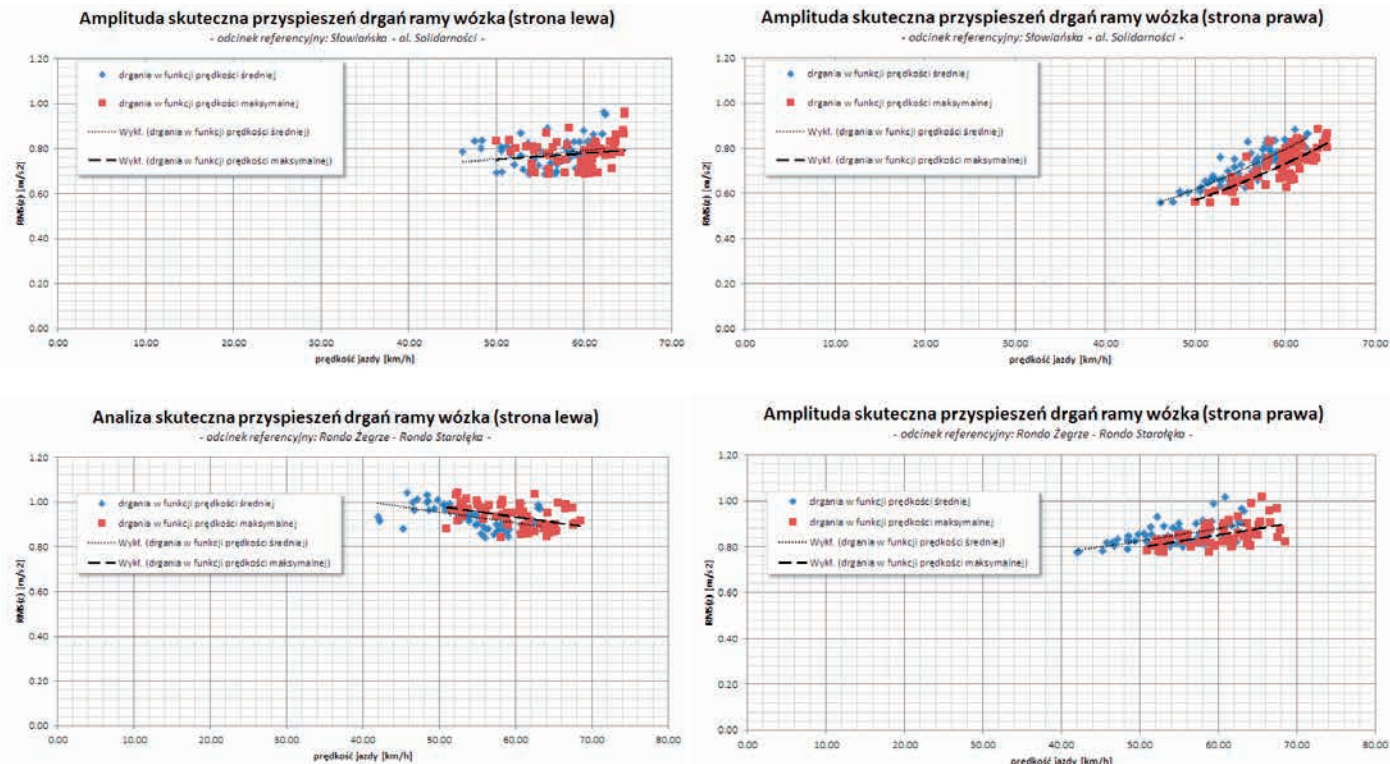
7. Ilustracja nieracjonalnego ustalania limitów prędkości jazdy

Potwierdzenie wizją lokalną wskazanych przez system „gorących miejsc” na infrastrukturze torowej daje podstawy do automatyzacji prowadzonych analiz oraz gradacji stopnia wyeksploatowania torów. Takie doraźne korzyści z zainstalowania systemu pozwalają na ułożenie harmonogramu napraw torowisk wg nowego kryterium – dynamicznego oddziaływania toru na pojazd. Rozwinięcie pełnych możliwości w zakresie monitorowania stanu i dynamicznego określania miejsca oraz zakresu niezbędnych prac naprawczych torowiska będzie możliwe dopiero po zebraniu danych długookresowych. Tylko na bazie takich danych jest możliwe wyznaczenie intensywności zużycia szyn a na ich podstawie predykcji stanów przyszłych umożliwiającej planowanie inwestycji infrastrukturalnych i działań naprawczych na sieci tramwajowej.

To samo kryterium proponuje się wykorzystać do racjonalizacji wprowadzanych ograniczeń prędkości na sieci tramwajowej. Jak wynika z dotychczasowych doświadczeń z eksploatacji przedstawianego systemu monitorowania wprowadzane ograniczenia prędkości na danych sekcjach nie mają nic wspólnego z rzeczywistym oddziaływaniem pojazdu na tor i toru na pojazd. Zebrane dane podważają zasadność stosowania ograniczeń prędkości jazdy bazujących tylko na danych z toromierzy, czy informacji o ostatnich remontach. Dobrym przykładem ilustrującym zagadnienie wyznaczania limitów prędkości jest torowisko w ciągu ulicy Królowej Jadwigi od Ronda Rataje do Mostu Dworcowego (rys. 7).

Na odcinku Rondo Rataje – ul. Serafitek limit 30 km/h jest notorycznie ignorowany przez motorniczych. Oczywiście jest to karygodne, natomiast okazało się, że efekty dynamiczne w postaci drgań są na tym odcinku torowiska niższe niż na innych sekcjach o wyższych parametrach technicznych przy tych samych prędkościach jazdy – ok 50 km/h. W związku z powyższym można zaproponować nowe kryterium doboru limitów prędkości w oparciu o rzeczywiste oddziaływanie pojazd-tor.

W trakcie eksploatacji systemu monitorowania układu biegowego i usprężynowania udało się również zweryfikować poprawność działania procedur analitycznych. Przykładem poprawnego zadziałania systemu było rozpoznanie stanu niezdatności technicznej amortyzatora drgań pionowych wózka atakującego. Na podstawie analizy porównawczej drgań obu stron ramy wózka wskazano niepoprawną pracę wspomnianego tłumika. Graficzne przedstawienie wyników gromadzenia danych przedstawiono na rysunku 8.

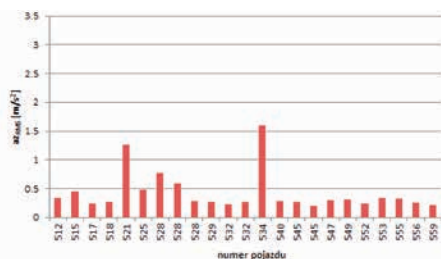


## 8. Wykresy różnic w charakterystykach drganiowych tłumików spowodowanych awarią jednego z nich (po lewej niezdatny tłumik)

Na podstawie danych zaprezentowanych z rysunku 8 opracowano technikę rozpoznawania stanu tłumików i jakościowej ewaluacji ich stanu. Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie procedur pomiarowych uruchamianych warunkowo. Pozwoliło to na automatyzację procesu akwizycji danych z systemu pokładowego w ten sposób, że odpowiednie procedury pomiarowe są uruchamiane tylko wtedy, gdy pojazd znajdzie się w ściśle zdefiniowanym obszarze geograficznym (wskazana sekcja infrastruktury) i dodatkowo będzie się poruszał z prędkością nie mniejszą niż progowa.

Przeprowadzone testy pozwoliły również na wykazanie przydatności opisywanego systemu w zakresie weryfikacji własności bieżących pojazdów nowych. Przeprowadzone badania udowodniły, że istnieje możliwość detekcji stanów awaryjnych także elementów podatnych układu usprężynowania bez ich demontażu. Na rysunku 9 przedstawiono wykres poziomu drgań rejestrowany na pudle tramwajów typu Solaris Tramino S105p.

Jak wynika z rysunku 9 w przypadku tramwajów o numerach bocznych 521 i 534



9. Wykres poziomu drgań dla Solaris Tramino S105p

monitorowany poziom drgań jest wyższy niż na innych egzemplarzach tramwajów tego samego typu. Po weryfikacji w zajezdni okazało się w tych dwóch egzemplarzach doszło do przedwczesnego zużycia elementów metalowo-gumowych usprężynowania pierwszego stopnia. Na potrzeby tej aplikacji zaproponowano metodę wyznaczania wartości granicznej a tym samym narzędzia klasyfikacji stanu elementów tramwaju wg teorii Neymana-Pearsona [4,5].

## Podsumowanie

System monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego jest nowoczesnym, kompleksowym rozwiązaniem w zakresie monitorowania stanu technicznego kluczowych układów i elementów układu bieżowego tramwaju oraz jakościowej oceny infrastruktury torowej. Dodatkowo system jest zdolny do gromadzenia i adaptacyjnego przetwarzania danych związanych z parametryzacją procesu transportowego. Możliwe jest dynamiczne pozyskanie danych telematycznych indywidualnie dla każdego pojazdu, co umożliwi wspomaganie decyzji zarządzania systemem transportowym na poziomie operacyjnym. Napływające dane umożliwiają nie tylko kontrolę bieżącego stanu systemu w ogóle, ale również weryfikację realności wykonania rozkładów jazdy, czy dynamiczną, bieżącą ocenę strat czasu na podstawie trajektorii ruchu pojazdów. System umożliwi również błyskawiczne reagowanie na zdarzenia niepożądane występujące w systemie transportowym

miasta oraz sytuacje kryzysowe czyniąc ITS sferą operacyjną a nie ideą.

Prezentowany system przeznaczony jest do zastosowania we wszystkich tramwajach eksploatowanych przez miejskie przedsiębiorstwa komunikacyjne w całej Polsce, a w przyszłości powinien stać się standardowym elementem wyposażenia każdego nowego tramwaju. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Raczyński J.: Miejski transport szynowy w Unii Europejskiej. Transport Miejski i Regionalny, 2005, nr 6, s. 2-9
- [2] Czechyra B.: Operational excitations in experimental research into dynamics of Light Rail Vehicles, XXIV Symposium Vibrations in Physical Systems, Poznan – Bedlewo, May 12-15, 2010,
- [3] Czechyra B., Firlik B., Tomaszewski F.: Technical state monitoring method of light rail track wear Proceedings of the Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring 2008, Edited by: UHL, OSTROWSKI, HOLNICKI-SZULC; DEStrech Publications, Inc., 439 North Duke Street Lancaster, Pennsylvania 17602 USA; page 167-174; ISBN 978-1-932078-94-7
- [4] Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych, Bibliotek Problemów Eksploatacji, Radom 2002; ISBN 83-7204-284-5
- [5] Gewert M., Skoczylas Z.: Elementy analizy wektorowej. Teoria, przykłady, zadania wyd.6, Oficyna Wydawnicza GiS, Wrocław 2010; ISBN: 978-83-62780-05-1