

BARTOSZ FIRLIK\*, ANDRZEJ CHUDZIKIEWICZ\*\*

## KONCEPCJA SYSTEMU MONITOROWANIA STANU TECHNICZNEGO LEKKICH POJAZDÓW SZYNOWYCH

### CONCEPTION OF A TECHNICAL STATE MONITORING SYSTEM FOR LIGHT RAIL VEHICLES

#### Streszczenie

Niniejszy artykuł opisuje koncepcję systemu monitorowania i diagnostyki przeznaczonego dla lekkich pojazdów szynowych. Omówiono podstawowe wymagania i założenia dotyczące systemu, jak również przewidywane tryby pracy. Opisano podsystem pokładowy systemu wraz z niezbędnymi do jego funkcjonowania czujnikami pomiarowymi, dobranymi na etapie symulacji komputerowej.

*Słowa kluczowe: monitorowanie stanu technicznego, diagnostyka, lekki pojazd szynowy*

#### Abstract

The paper describes the main concept of the technical state monitoring systems for light rail vehicles. Functional requirements, assumptions and procedures were described, as well as the main board subsystem with necessary transducers, which were optimized during the simulation process.

*Keywords: technical state monitoring, diagnostics, light rail vehicle*

\* Dr inż. Bartosz Firlik, Zakład Pojazdów Szynowych, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

\*\* Prof. dr hab. inż. Andrzej Chudzikiewicz, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska.

## 1. Wstęp

Systemy monitorowania stanu technicznego konstrukcji przechodzą obecnie gwałtowny rozwój w rozmaitych obszarach techniki. Dotyczy to również dziedziny pojazdów szynowych, gdzie zarówno w publikacjach naukowych, jak i w nowych przepisach, coraz więcej miejsca poświęca się monitorowaniu poszczególnych systemów pojazdu [1–4].

Większość systemów monitorowania stanu pojazdu i toru stosuje się jest wyłącznie w przypadku klasycznych pojazdów szynowych – a ostatnio zwłaszcza w przypadku kolei dużych prędkości (np. konieczność monitorowania stanu łożysk tocznych zestawów kołowych). Lekkie pojazdy szynowe typu tramwaje nadal pozostają niejako w cieniu tych zainteresowań. Tymczasem renesans komunikacji tramwajowej w Europie i na świecie powoduje, że zapomniane, a nawet często zlikwidowane linie tramwajowe wracają do łask, a tramwaje z roku na rok przewożą coraz większą liczbę pasażerów.

W kontekście tym bardzo ważne powinno być zagadnienie monitorowania stanu tego typu środków transportu w różnych warunkach eksploatacji. Poprawa bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów tramwajowych powinna być jednym z ważniejszych zagadnień w działaniach przedsiębiorstw transportu publicznego. Monitorowanie stanu pojazdu ma istotny wpływ na właściwe planowanie i obniżenie kosztów utrzymania taboru, gdyż wczesne rozpoznanie zużycia poszczególnych elementów pojazdu umożliwia odpowiednie zaplanowanie jego utrzymania, zmniejszając ryzyko konieczności nagłej i nieplanowanej reakcji w przypadku przekroczenia krytycznych wartości zużycia.

W niniejszym artykule opisano wymagania i podstawowe założenia dotyczące autorskiego systemu monitorowania i diagnostyki przeznaczonego dla lekkich pojazdów szynowych.

## 2. Wymagania funkcjonalne

### 2.1. Podstawowe założenia

Założenia wstępne dla omawianego systemu, przyjęte już na początku wykonywanych prac i analiz, są następujące:

- monitorowanie stanu pojazdu 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,
- podstawową cechą systemu powinna być prostota wykonania i niskie koszty implementacji układu monitorowania,
- system musi być kompatybilny z istniejącymi systemami informatycznymi tramwaju i nie może zakłócać ich działania,
- poszczególne przetworniki stanowią system rozproszony ułatwiający skalowanie systemu w zależności od typu pojazdu,
- diagnostyką docelowo objęte są wszystkie wózki pojazdu,

- architektura systemu powinna być otwarta tak, aby w późniejszym etapie możliwe było rozszerzenie jego funkcjonalności.

System przeznaczony będzie do zastosowania we wszystkich tramwajach eksploatowanych przez miejskie przedsiębiorstwa komunikacyjne w całej Polsce, a w przyszłości mógłby stać się standardowym elementem wyposażenia każdego nowego tramwaju.

Nadrzędnym celem przyświecającym twórcom systemu jest możliwość jego łatwego wdrożenia dla szerokiej grupy użytkowników docelowych. Dlatego też charakteryzuje się on dużą uniwersalnością i modularnością, która umożliwia łatwe dostosowanie poszczególnych komponentów. Ze względu na znaczne zróżnicowanie rynku docelowego, który nie jest jednolity w zależności od miasta, operatora transportu czy lokalizacji, zarówno pod względem funkcjonalnym (sposób i system zarządzania flotą pojazdów szynowych), jak i technicznym (poziom zaawansowania infrastruktury technicznej, sieciowej i informatycznej w miastach, stan ilościowy i jakościowy floty, rozpiętość wieku użytkowanych równolegle pojazdów), konieczność przygotowania otwartej architektury systemu jest kluczowym czynnikiem determinującym sukces w integracji, wdrożeniu i upowszechnieniu opisywanego systemu.

Z powyższych powodów strukturę systemu podzielono na wyraźnie określone elementy funkcjonalne, do których należą:

- podsystem pokładowy,
- podsystem użytkownika,
- podsystem serwera i przetwarzania danych.

Każdy z podsystemów jest integralną częścią całości, jednak ze względu na przyjętą architekturę, dokonywanie modyfikacji w pojedynczym podsystemie nie powoduje konieczności ingerencji w pozostałe elementy systemu.

## 2.2. Monitorowane zjawiska

System będzie przystosowany do monitorowania i jakościowej oceny następujących zjawisk:

- zużycie elementów zawieszenia na I i II stopniu usprężynowania (utrata własności),
- uszkodzenie powierzchni tocznej koła (poligonizacja, płaskie miejsce),
- bieżąca ocena stabilności biegu oraz komfortu jazdy (na podstawie wybranych kryteriów),
- bieżąca ocena bezpieczeństwa przed wykojeniem (na podstawie wybranych kryteriów),
- ocena poziomu dźwięku w przedziale pasażerskim.

## 2.3. Tryby pracy

### 2.3.1. Wstęp

Monitorowanie stanu pojazdu wykonywane będzie na trzech niezależnych poziomach operacyjnych. Co 10 sekund system sprawdzał będzie stan przetworników, wyznaczając miary punktowe (dla drgań) i wartości maksymalne dla inklinometrów/żyroskopów z przebiegów 5-sekundowych. Wyznaczone wielkości będą porównywane z tabelą wzorca. W przypadku przekroczenia jakiegokolwiek wartości komunikat będzie logowany do pamięci nieulotnej z etykietą telemetryczną. W przeciwnym razie zapisany zostanie marker je-

dynkowy o poprawnym funkcjonowaniu sytemu. Dodatkowo raz na zmianę (czyli raz dziennie) zapisywany będzie sygnał dynamiczny w postaci chwilowych wartości przyspieszeń drgań oraz bieżącej wartości żyroskopów, oraz prędkości jazdy. Plik ten – jako oddzielny plik w pamięci nieulotnej – opisany będzie etykietą pozwalającą na jednoznaczne odtworzenie warunków zbierania danych. W związku z tym w pamięci nieulotnej będą zapisywane dwa rodzaje danych: dane skalarne w postaci tablicy i dane dynamiczne w postaci usystematyzowanych wektorów.

### 2.3.2. Pętla nadrzędna

W pętli nadrzędnej odbywał się będzie ciągły monitoring krytycznych układów/procesów tramwaju. System będzie gromadził dane z czujników drgań w postaci danych dynamicznych w rejestrze przesuwym kolejki FIFO z buforem pozwalającym na uzyskanie dziesięciosekundowego okna czasowego – 3 sekundy przed i 7 sekund po zdarzeniu inicjującym występującym w chwili  $t_0$ . Zdarzeniem inicjującym może być:

- pozycja telemetryczna pojazdu,
- prędkość jazdy,
- przekroczenie wartości progowych odczytanych z przetworników (wartości graniczne ustalone będą w badaniach laboratoryjnych/eksploatacyjnych),
- zdalne wywołanie procedury diagnostycznej przez dyspozytora, nadzór ruchu lub inne jednostki do tego upoważnione przez operatora,

W chwili wystąpienia zdarzenia inicjującego generowana będzie diagnoza cząstkowa polegająca na rejestracji wyznaczonych parametrów z poszczególnych czujników/przetworników.

Na tym poziomie algorytmu diagnostycznego będą rejestrowane tylko dane skalarne jako parametry wyznaczone z danych źródłowych (wartości maksymalne, RMS, międzyszczytowe, itd.). Po wystąpieniu zdarzenia inicjującego będzie generowany komunikat zapisywany w pamięci nieulotnej.

### 2.3.3. Procedury uruchamiane warunkowo

Procedury te będą uruchamiane tylko na referencyjnych odcinkach toru wskazanych dla obiektywnej oceny stanu elementów usprężynowania. Informacje te będą podstawą do wyznaczenia stanów granicznych poszczególnych elementów zawieszenia z uwzględnieniem typu pojazdu, a zebrane dane będą podstawą opracowania procedur predykcji stanów przyszłych w aspekcie planowania terminu i zakresu koniecznych napraw lub obsługi.

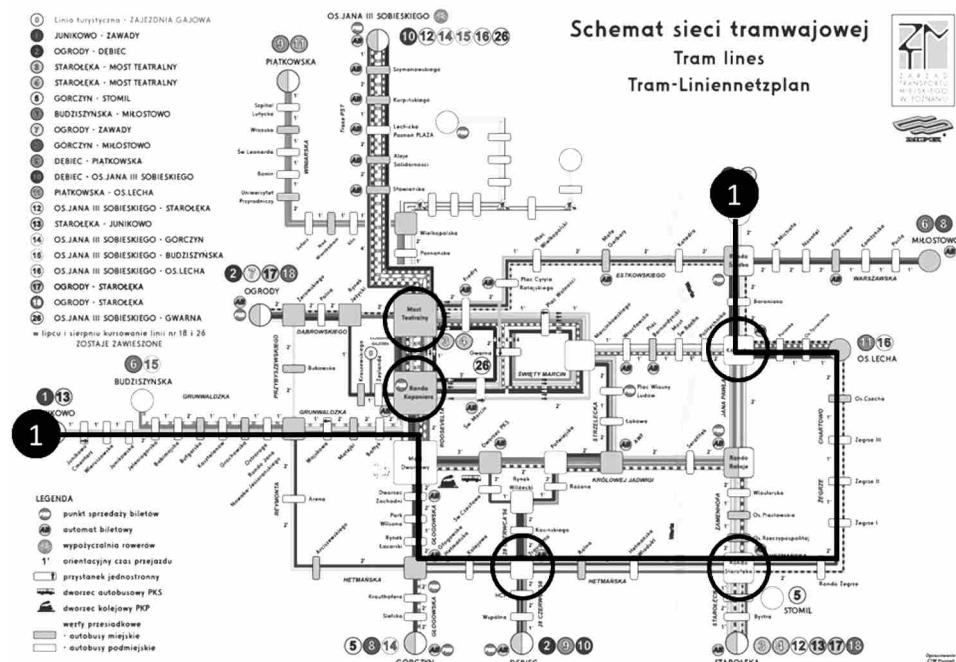
Wielkościami wyzwalającymi będą:

- pozycja telemetryczna (wybrany odcinek toru o znanej charakterystyce),
- odpowiednia prędkości jazdy.

Na tym poziomie algorytmu diagnostycznego są rejestrowane dane skalarne oraz dane dynamiczne z przetworników. Plik z danymi źródłowymi zapisywany będzie w pamięci nieulotnej.

Zakłada się, że w każdym mieście zostanie wybrana jak najmniejsza liczba odcinków referencyjnych, przy zachowaniu kryterium, żeby na każdej linii znajdował się przynajmniej jeden taki odcinek. Wybraną przykładową lokalizację referencyjnych punktów toru dla miasta Poznania przedstawiono na rys. 1.

Wstępna analiza wykazała, że w mieście o bardzo rozbudowanej sieci tramwajowej (Poznań) wystarczy załedwie pięć referencyjnych odcinków toru, aby każdy tramwaj przejechał przynajmniej przez jeden z nich podczas codziennego kursowania na danej linii. Przyjmując, że czas przejazdu najdłuższą linią (w Poznaniu linia nr 1) wynosi ok. 45 minut, diagnostyka stanu pojazdu będzie się odbywała co najmniej raz na godzinę, co dla pojazdów typu tramwaj jest aż nadto wystarczające.



Rys. 1. Przykładowy schemat rozmieszczenia referencyjnych punktów pomiarowych oraz przebieg przykładowej linii tramwajowej w Poznaniu [5]

Fig. 1. Technical state monitoring points and the exemplary course of a tram line in Poznan [5]

Przewiduje się monitorowanie stanu pojazdu zarówno podczas jazdy po prostym odcinku toru (z wymuszeniem w postaci przejazdu przez zwrotnice i krzyżownice), jak i w wybranym łuku o małym promieniu (podczas skrętu zarówno w lewą, jak i prawą stronę).

#### 2.3.4. Procedury alarmowe

Procedura alarmowa będzie uruchamiana w razie zdarzenia krytycznego (kolizja, napad) i polegać będzie na zarejestrowaniu danych dynamicznych w pamięci nieulotnej z ostatniego 10-sekundowego okna czasowego i przejście w stan rejestratora dźwięku do chwili zapelnienia zasobów pamięci lub wyłączenia przez nadzór ruchu, policję, właściciela. Na tym poziomie algorytmu diagnostycznego rejestrowane będą tylko dane dynamiczne z przetworników. Plik z danymi źródłowymi będzie zapisywany w pamięci nieulotnej.

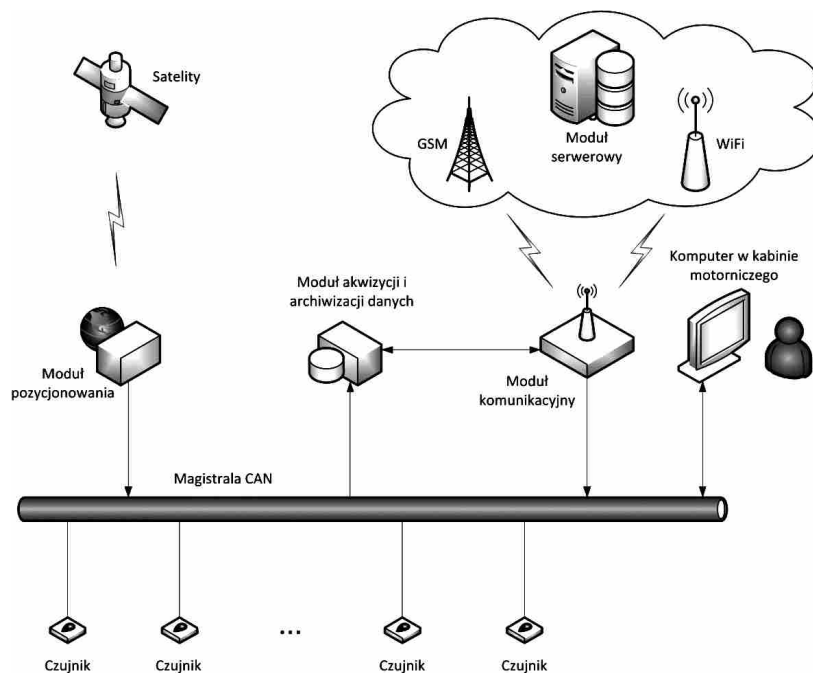
## 4. Podsystem pokładowy systemu

### 4.1. Architektura

Podsystem pokładowy to część systemu instalowana w monitorowanych pojazdach. Jego zadaniem będzie akwizycja sygnałów i przesyłanie danych pomiarowych pochodzących z czujników umieszczonych w różnych punktach tramwaju, które pozwolą na oszacowanie jego stanu na podstawie analizy wartości chwilowych oraz trendów występujących w gromadzonych danych.

Od sprawnego działania tego podsystemu zależne jest funkcjonowanie całości rozwiązania, dlatego istotne jest staranne dobranie właściwych podzespołów wchodzących w jego skład tak, by zapewnić zarówno niezbędną częstotliwość i dokładność pomiarów, jak i odpowiednią przepustowość i niezawodność łączy komunikacyjnych. Dotyczy to zarówno wyboru sprzętu, jak i oprogramowania systemowego.

Architektura podsystemu powinna być otwarta i skalowalna, oparta na schemacie wielu komunikujących się ze sobą modułów. Takie rozwiązanie pozwoli na ewentualne rozszerzenie systemu o dodatkowe czujniki oraz zastosowanie go dla różnych typów pojazdów bez konieczności przeprojektowywania całości. Na rys. 2 przedstawiono schemat proponowanej architektury.



Rys. 2. Architektura podsystemu pokładowego

Fig. 2. Main board subsystem architecture

Moduły wchodzące w skład podsystemu muszą mieć możliwość odpowiednio szybkiej i niezawodnej komunikacji między sobą. Proponowane są następujące moduły sprzętowe:

- moduły czujników pomiarowych – urządzenia wyposażone w odpowiednie czujniki, umieszczone w miejscach pomiaru,
- moduł akwizycji i rejestracji danych – odpowiedzialny za pobieranie i rejestrowanie danych pomiarowych i ewentualne przekazywanie ich modułowi komunikacyjnemu,
- moduł pozycjonowania pojazdu – odpowiedzialny za wyznaczanie pozycji geograficznej pojazdu (GPS + system zliczeniowy),
- moduł komunikacyjny – odpowiedzialny za zapewnienie szkieletu komunikacyjnego dla innych modułów; powinien obsługiwać połączenia w sieciach typu CAN, GSM/UMTS/HSDPA i Wi-Fi,
- moduł komputera motorniczego – moduł pozwalający na bezpośrednie sygnalizowanie zdarzeń motorniczemu.

#### 4.2. Czujniki pomiarowe

System zostanie wyposażony w szereg rozproszonych modułów czujnikowych dokonujących pomiaru drgań oraz nachyleń w różnych częściach pojazdu. Wszystkie czujniki będą okresowo (z zadaną częstotliwością) przysyłać dane za pomocą magistrali CAN.

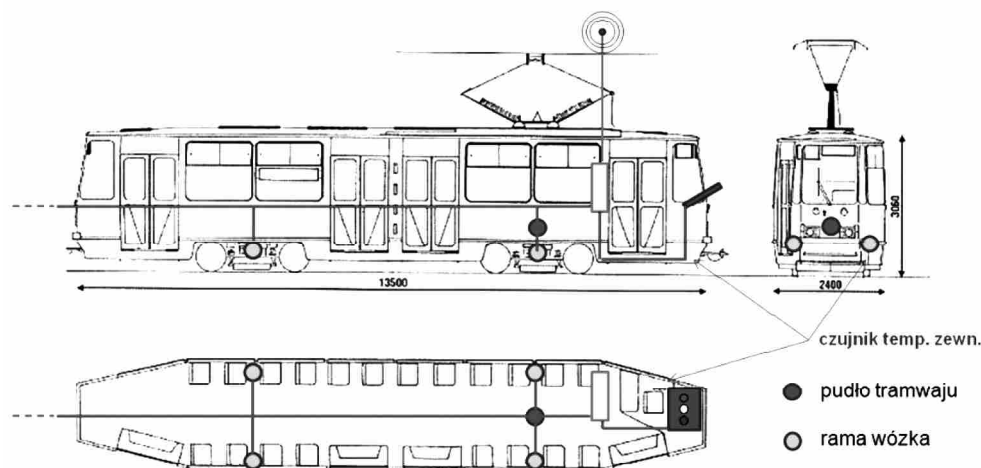
Na podstawie symulacji, obliczeń i analizy literaturowej stwierdzono, że optymalnymi miejscami rejestracji sygnałów przyspieszeń drgań są następujące elementy pojazdu:

- rama każdego z wózków tramwaju (przetworniki umieszczone na podłużnicach, w osi belki bujawkowej),
- pudło pojazdu (miejsce pod podłogą, nad czopem skrętu pierwszego wózka).

Wykorzystane będą następujące typy czujników pomiarowych:

- czujniki żyroskopowe na pudle pojazdu (pomiar kąta nachylenia pudła pojazdu względem ziemi),
- czujnik trójosiowy przyspieszeń drgań na pudle pojazdu (pomiar przyspieszeń drgań pudła pojazdu w osiach poprzecznej i pionowej w paśmie 0–20 Hz),
- czujnik żyroskopowy na ramie wózka (pomiar kąta nachylenia wózka względem ziemi – zakres pomiarowy czujnika wynosi  $\pm 15^\circ$ ),
- czujnik trójosiowy przyspieszeń drgań na ramie wózka (pomiar przyspieszeń drgań występujących na ramie wózka w osiach poprzecznej i pionowej w paśmie 0–100 Hz).

Rozmieszczenie czujników pomiarowych będzie się różniło w zależności od typu pojazdu. Przykładowy schemat rozmieszczenia dla tramwaju typu 105 N przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników na tramwaju typu 105 N

Fig. 3. Transducers distribution on a typical 105 N tram

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe wymagania dla nowoczesnego, rozproszonego systemu monitorowania stanu lekkiego pojazdu szynowego. Omówiono ideę rozwiązania, podstawowe bloki funkcjonalne i zasadę działania. Dla proponowanego systemu stworzono solidną podstawę teoretyczną, opartą na wieloletnich doświadczeniach autorów i ich dorobku naukowym.

Wskazano i zasugerowano użycie w pracach implementacyjnych najnowszych technologii, zarówno sprzętowych, jak i tych dotyczących oprogramowania. Daje to gwarancję bardzo małej awaryjności, pewności i dokładności otrzymanych danych pomiarowych, a także wygody i komfortu obsługi.

Architekturę systemu cechuje otwartość, modułowość i pełna skalowalność. Poprzez dołączanie różnorodnych urządzeń do współdzielonych kręgosłupów komunikacyjnych, a także precyzyjne zdefiniowanie interfejsów i protokołów komunikacyjnych, bardzo proste i naturalne staje się zwiększanie funkcjonalności rozwiązania.

*Artykuł powstał w związku z realizacją projektu MONIT („MONITOROWANIE TECHNICZNEGO STANU KONSTRUKCJI I OCENA JEJ ŻYWOTNOŚCI”), Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka Oś priorytetowa 1: Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.1: Wsparcie badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy.*



## Literatura

- [1] Hayashi Y., Tsunashima H., Marumo Y., *Fault Detection of Railway Vehicle Suspension Systems Using Multiple-Model Approach*, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 1, No. 1/2008, 88-99.
- [2] Bruni S., Goodall R., Mei T.X., Tsunashima H., (2007), *Control and Monitoring for Railway Vehicle Dynamics*, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, 743-779.
- [3] Goda K., Goodall, R.M., (2004), *Fault Detection and Isolation System to a Railway Vehicle Bogie*, Vehicle System Dynamics, Supplement 41, 468-476.
- [4] Li P., Goodall, R.M., (2004), *Model-based Condition Monitoring for Railway Vehicle System*, Proceedings of the UKACC International Conference on Control, University of Bath, UK.
- [5] [www.mpk.poznan.pl](http://www.mpk.poznan.pl) (Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu).