

BARTOSZ FIRLIK, BARTOSZ CZECHYRA*

SYMULACYJNE PODSTAWY SYSTEMU MONITOROWANIA STANU TECHNICZNEGO LEKKIEGO POJAZDU SZYNOWEGO

TECHNICAL STATE MONITORING SYSTEM FOR LIGHT RAIL VEHICLE – ASSUMPTIONS AND SIMULATION BASIS

Streszczenie

Artykuł przedstawia założenia i podstawy symulacyjne systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego. Omówiono główne cele i metodykę prowadzenia badań symulacyjnych. Zamieszczono przykładowe charakterystyki drganiowe uzyskane na podstawie symulacji komputerowej oraz wyznaczone na ich podstawie miary punktowe, które są podstawą do określenia założeń dla systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego.

Słowa kluczowe: tramwaj, lekki pojazd szynowy, system monitorowania stanu technicznego

Abstract

The paper is dedicated to the assumptions and simulation basics of the technical state monitoring system for light rail vehicle. The paper discusses the main objective of this work, and the methodology used for the computer simulations. It contains also some examples of vibration characteristics from the simulation of the light rail vehicle dynamics on worn track. These characteristics became the basis for determining the assumptions to build a monitoring system of technical state monitoring for light rail vehicle.

Keywords: tramway, light rail vehicle, technical state monitoring

* Dr inż. Bartosz Firlik, dr inż. Bartosz Czechyra, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

Poprawa bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów – w tym także tramwajów, jest jednym z bardzo ważnych zagadnień w działaniach przedsiębiorstw transportu publicznego. Częste monitorowanie stanu pojazdu i toru ma istotny wpływ na właściwie planowanie i obniżenie kosztów utrzymania taboru i infrastruktury. Wczesne rozpoznanie zużycia elementów układu biegowego pojazdu umożliwia odpowiednie zaplanowanie jego utrzymania, zmniejszając ryzyko nagłej i nieplanowanej reakcji w przypadku przekroczenia krytycznych wartości zużycia.

Tymczasem przeprowadzona na potrzeby niniejszego artykułu analiza istniejącego stanu wykazała, że przedsiębiorstwa eksploatujące pojazdy tramwajowe w Polsce nie posiadają systemów bieżącego monitorowania stanu pojazdu i prognozowania stopnia jego zużycia. Kontrola elementów układu biegowego tramwaju jest wykonywana jedynie przy przeglądach okresowych i często nie obejmuje chociażby sprawdzania stanu tłumików czy innych elementów podatnych. Stan techniczny pojazdu nie jest monitorowany w sposób ciągły, a przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej nie weryfikują wpływu poszczególnego typu uszkodzeń na dynamikę, a tym samym na bezpieczeństwo jazdy tramwaju na danym odcinku. Ponadto stan wielu elementów tramwaju określany jest głównie przez ogląd wzrokowy.

Pogarszający się stan techniczny pojazdu tramwajowego wpływa niekorzystnie nie tylko na bezpieczeństwo przed wykołaceniem, ale również na stabilność biegu tramwaju oraz hałas generowany do otoczenia. A zatem monitorowanie stanu technicznego lekkich pojazdów szynowych powinno przyczynić się nie tylko do poprawy właściwości biegowych tramwaju, ale również jego wpływu na środowisko. Umożliwi także dokładniejsze zarządzanie procesem napraw – wskazując elementy najczęściej zużywające się w eksploatacji oraz prognozując ich stan w kolejnych okresach czasowych. Istotnym zagadnieniem jest również możliwość wyznaczenia optymalnej z punktu widzenia komfortu i bezpieczeństwa jazdy prędkości danego tramwaju na konkretnym odcinku toru.

2. Główne założenia systemu

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

- monitorowanie stanu technicznego pojazdu realizowane będzie z pozycji pojazdu,
- w procesie monitorowania stanu jako podstawowy nośnik informacji wykorzystany będzie sygnał wibroakustyczny (pomiar przyspieszeń drgań),
- badane zjawiska oceniane będą wyłącznie jakościowo, monitorowane będzie przekroczenie dopuszczalnych poziomów,
- podstawową cechą systemu powinna być prostota wykonania i niskie koszty implementacji,
- system musi być kompatybilny z istniejącymi systemami informatycznymi tramwaju i nie może zakłócać ich działania,
- diagnostyką docelowo objęte są wszystkie wózki pojazdu,
- jednostka centralna systemu jest zainstalowana w pojeździe,

- poszczególne przetworniki stanowią system rozproszony ułatwiający skalowanie systemu w zależności od typu pojazdu,
- architektura systemu powinna być otwarta tak, aby w późniejszym etapie możliwe było rozszerzenie jego funkcjonalności.

System monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego powinien być 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 komfortu jazdy,
- bieżąca ocena bezpieczeństwa przed wykołaceniem (na podstawie wybranych kryteriów),
- ocena poziomu dźwięku w przedziale pasażerskim.

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

3. Podstawy symulacyjne metody

3.1. Cel badań

Głównym celem badań symulacyjnych było określenie efektywności przyjętej metody monitorowania i diagnozowania stanu lekkiego pojazdu szynowego, jak również określenie optymalnej liczby punktów pomiarowych na pojeździe oraz opracowanie i wyznaczenie odpowiednich miar oraz wskaźników oceny stanu technicznego pojazdu, które zostaną wykorzystane przy budowie prototypu systemu monitorowania.

Metoda, jaką zastosowano w tym przypadku, to symulacja ruchu pojazdu w założonych warunkach opisujących stan toru przez jego nierówności i rodzaj trasy (proste, łuki, rozjazdy, krzyżownice), natomiast stan pojazdu przez odstrajanie jego parametrów, odwzorowując zużycie elementów podatnych, poligonizację powierzchni tocznych kół itp. Podczas symulacji w wybranych punktach pojazdu zarejestrowane zostały wielkości kinematyczne i dynamiczne (przemieszczenia, prędkości, przyspieszenia, siły, naprężenia, itp.), które poddano odpowiedniej analizie w dziedzinie czasu i częstotliwości, obliczając charakterystyki tych sygnałów, a następnie wyznaczając odpowiednie miary punktowe dla każdego przypadku zużycia.

3.2. Plan symulacji

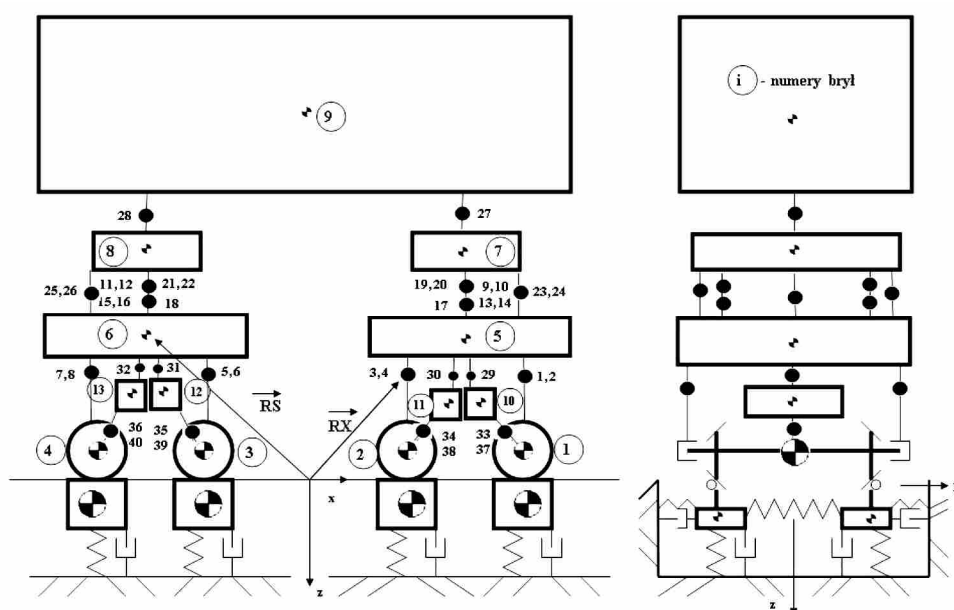
Symulacje wykonano wariantowo, dla różnych, zmieniających się warunków jazdy. Zmiennymi były: parametry toru, parametry pojazdu, prędkość jazdy, rodzaj i typ pojazdu. Symulacje były wykonywane dla dwóch typów toru, najczęściej stosowanych w sieciach tramwajowych polskich miast – toru składającego się z szyn kolejowych S60 (lub wariantowo S49) [2] oraz toru składającego się z rowkowych szyn tramwajowych

Ri59N, stosowanych na łukach i w miejscach, gdzie torowisko zabudowane jest w jezdni [3].

Przyjęto, że symulacje będą wykonywane z pozycji następujących pojazdów:

- klasyczny wagon tramwajowy o 100% udziale wysokiej podłogi (najpopularniejszy pojazd eksploatowany przez polskie przedsiębiorstwa komunikacyjne),
- przegubowy tramwaj niskopodłogowy, o 70–100% udziale niskiej podłogi (powszechnie kupowany obecnie przez wiele polskich miast).

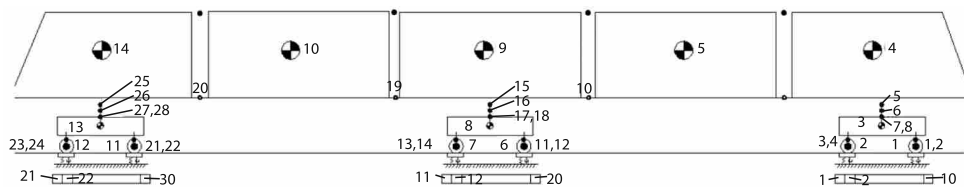
Na rys. 1 pokazano schemat wzajemnych powiązań poszczególnych brył sztywnych przyjętego modelu fizycznego tramwaju wysokopodłogowego.



Rys. 1. Model mechaniczny klasycznego tramwaju wysokopodłogowego

Fig. 1. Physical model of a typical high-floor tram

Analogiczny model wykonano dla nowoczesnego tramwaju niskopodłogowego, którego schemat przedstawiono na rys. 2.



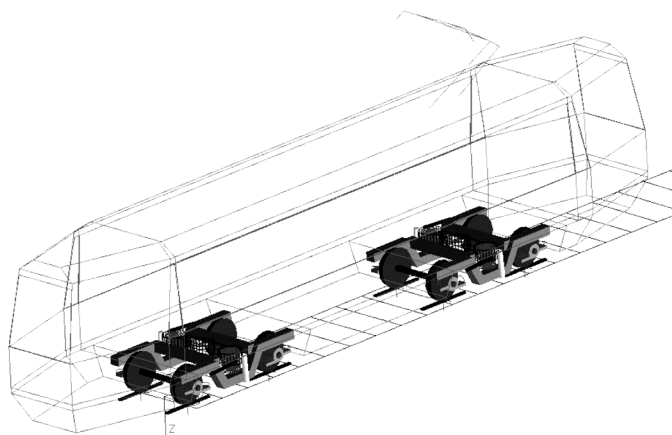
Rys. 2. Model mechaniczny wielocłonowego tramwaju niskopodłogowego

Fig. 2. Physical model of a multibody low-floor tram

3.3. Opis stosowanych programów symulacyjnych

Analizy symulacyjne przeprowadzono wykorzystując autorskie programy oparte na systemie symulacyjnym ACSL-v.11. Dodatkowe wyposażenie tego systemu w bloki programowe, które na podstawie topologii i innych danych modelowych generują układy równań ruchu pojazdu szynowego, umożliwia względnie szybkie opracowanie modeli matematycznych do analiz statycznych i dynamicznych badanego obiektu.

Wykresy przebiegów czasowych wielkości obliczanych podczas symulacji, jak również obróbkę statystyczną tych wielkości wykonano w programie FlexPro (w wersji 8.0).



Rys. 3. Model symulacyjny klasycznego tramwaju wysokopodłogowego

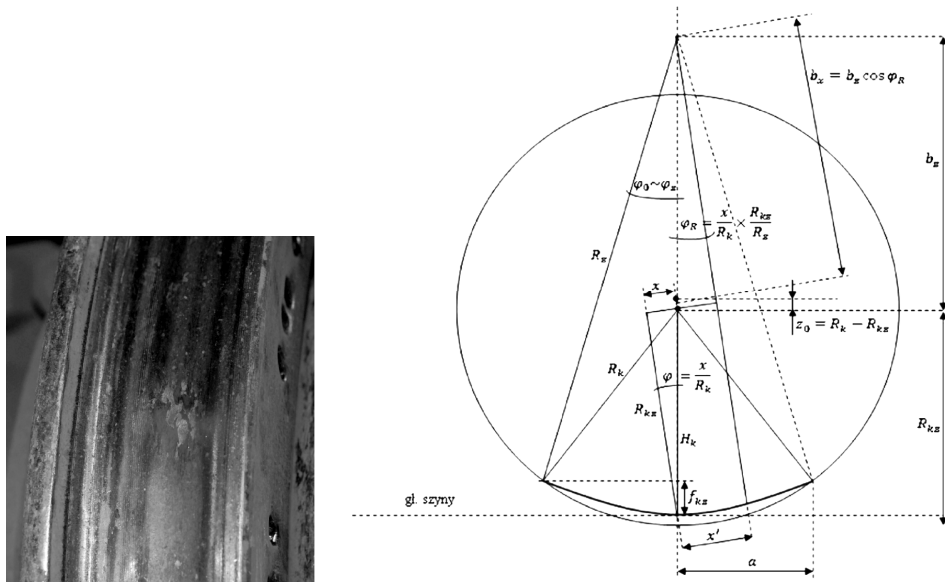
Fig. 3. Simulation model of a typical high-floor tram

Część symulacji dotycząca analiz odpowiedzi dynamicznej pojazdu na wymuszenie pochodzące od toru, wykonano za pomocą programu symulacyjnego Universal Mechanism, natomiast model tramwaju niskopodłogowego wykonano w programie Simpack, wykorzystując jego szerokie możliwości w zakresie modelowania nieliniowych elementów podatnych. Na rys. 3 przedstawiono widok modelu tramwaju w programie symulacyjnym.

4. Przykładowe wyniki symulacji

4.1. Zużycie powierzchni tocznej koła

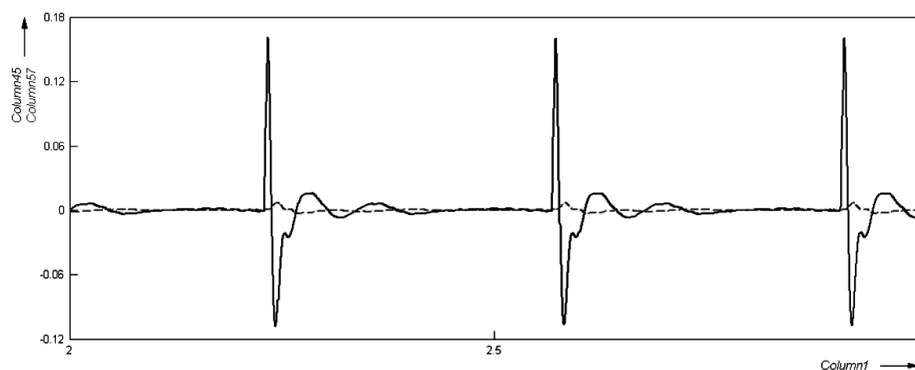
Splaszczania okręgu tocznego koła (rys. 4) powstają w czasie eksploatacji taboru głównie w wyniku nieprawidłowej pracy urządzeń hamulcowych lub braku umiejętności motorniczego. Eksploatacja tramwaju z nadmiernie zużytą powierzchnią toczną koła powoduje hałas i drgania, znacząco pogarszające komfort jazdy pasażerów w tramwaju, jak również warunki życia mieszkańców mieszkających w pobliżu tras tramwajowych. Ponadto nie-usunięte w porę płaskie miejsca mogą stać się przyczynami licznych uszkodzeń toru, a skrajnie nawet pęknięcia szyn, luzowania obręczy kół i innych awarii.



Rys. 4. Przykład płaskiego miejsca na powierzchni tocznej koła oraz sposób jego matematycznego opisu w programie symulacyjnym

Fig. 4. A wheel-flat example and it's mathematical representation in the simulation software

Poniżej przedstawiono postać przyspieszeń drgań pionowych ramy wózka (linia niebieska) i pudła (linia fioletowa), będącą odpowiedzią na płaskie miejsce o długości 2 cm podczas jazdy tramwaju z prędkością 18 km/h po idealnie gładkim torze.



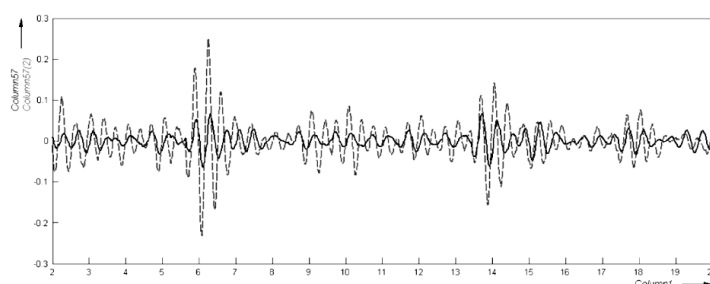
Rys. 5. Przyspieszenie drgań pionowych ramy wózka i pudła pojazdu (płaskie miejsce)

Fig. 5. Vertical accelerations on bogie frame and carbody (due to a wheel-flat)

4.2. Utrata sztywności na II stopniu usprężynowania

Bieżący przypadek dotyczył utraty własności sprężyny na II stopniu sprężynowania. Wykonano szereg symulacji dla różnych wariantów zmiany współczynnika sztywności.

Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi przyspieszeń drgań pionowych zarejestrowanych na pudle tramwaju dla skrajnego przypadku pęknięcia sprężyny śrubowej II stopnia usprężynowania, na skutek czego nadwozie oparło się na odbijakach. Kolorem niebieskim zaznaczono przebieg nominalny, kolorem fioletowym przebieg z uszkodzoną sprężyną II stopnia usprężynowania.



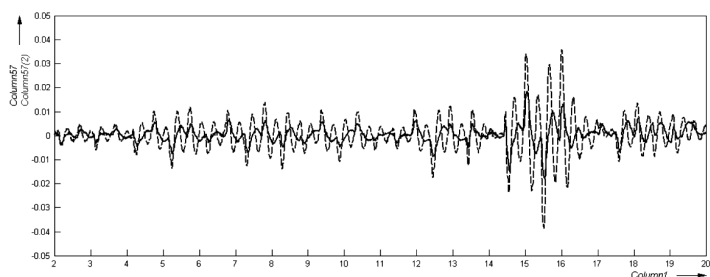
Rys. 6. Przebieg pionowych przyspieszeń drgań pionowych pudła tramwaju (prędkość 18 km/h)

Fig. 6. Vertical carbody acceleration (speed 18 km/h)

4.3. Zatarcie tłumika na II stopniu usprężynowania

Bieżący przypadek symulacyjny dotyczył zatarcia tłumika pionowego na II stopniu usprężynowania. Jest to typowy przypadek w tłumikach tramwajowych polskiej konstrukcji, które na skutek niewystarczającego smarowania zacierają się, tracąc swoją charakterystykę.

Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi przyspieszeń drgań w kierunku pionowym zarejestrowanych pudle tramwaju dla wprowadzonej prędkości tłumienia pionowego wynoszącej 0.1 wartości nominalnej. Pojazd porusza się z prędkością 2 m/s (7 km/h) po zużyтым odcinku toru tramwajowego. Kolorem niebieskim zaznaczono przebieg nominalny, a kolorem fioletowym przebieg dla tłumika zatartego.



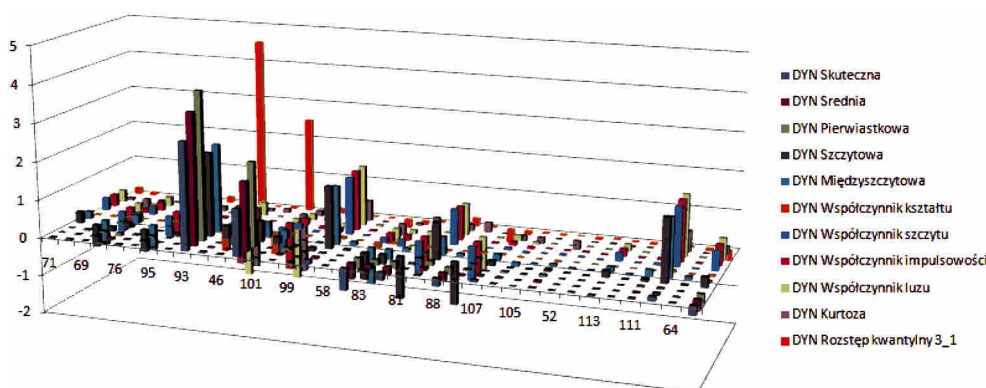
Rys. 7. Przebieg przyspieszeń drgań pionowych pudła tramwaju (prędkość 7 km/h)

Fig. 7. Carbody acceleration (speed 7 km/h)

4.4. Graniczne miary punktowe

W podobny do prezentowanych wyżej sposób wykonano w sumie kilkaset symulacji dla kilkudziesięciu sytuacji badawczych (odstrojone parametry pojazdu na torze o różnym stopniu zużycia). Podczas symulacji rejestrowano sygnały z 16 wirtualnych czujników pomiarowych, na podstawie których wyznaczono i analizowano następujące miary:

- amplitudy: średnia, skuteczna, pierwiastkowa, szczytowa, międzyszczytowa,
- odchylenie standardowe,
- współczynniki: kształtu, szczytu, impulsowości, luzu,
- skośność, kurtoza oraz rozstęp kwartylny,
- współczynnik korelacji Pearsona (*Pearson's correlation coefficient*),
- współczynnik korelacji zgodności (*concordance correlation coefficient*).



Rys. 8. Miary punktowe dla zużycia tłumika II stopnia usprężynowania (prędkość 7 km/h)

Fig. 8. Measures calculated for secondary suspension damper defect (speed 7 km/h)

Na rys. 8. przedstawiono przykładowe względne (sygnał nominalny) miary punktowe, wyznaczone dla przypadku utraty własności tłumika pionowego II stopnia usprężynowania.

5. Wnioski

Przeprowadzone analizy symulacyjne wykazały, że dla badanych typów tramwajów istnieje związek pomiędzy stopniem zużycia elementów układu biegowego, a wartościami przyspieszeń drgań pionowych i poprzecznych, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Potwierdza to poczynione wcześniej założenia o możliwości oparcia metody monitorowania stanu lekkiego pojazdu szynowego na czujnikach przyspieszeń drgań, umieszczonych na poszczególnych stopniach usprężynowania.

Na podstawie kilkuset symulacji wyznaczono odpowiednie miary punktowe dla każdego przypadku zużycia, które mogą stanowić bazę do sformułowania późniejszych jakościowych kryteriów oceny stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego. Wyznaczono również optymalne miejsca umieszczenia czujników pomiarowych na pojeździe, którymi są:

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

Dla każdego przypadku zużycia zdefiniowano odrębną metodykę badania i oceny. Przykładowo system do jakościowego monitorowania stanu powierzchni tocznych kół powinien składać się z przetwornika drgań pionowych umieszczonego na ramie wózka lub pudle pojazdu. Dzięki temu wystarczy zastosowanie jednego przetwornika na wózku, bez konieczności wyposażania w czujniki każdego z kół osobno. Analizy symulacyjne wykazały, że przetwornik drgań umieszczony na podłodze pudła nad pierwszym wózkiem tramwaju jest w stanie zarejestrować również płaskie miejsce na kole drugiego wózka w tym samym członie pojazdu.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych sugeruje się, aby po badaniach eksperymentalnych na rzeczywistym pojeździe rozważyć prostszą wersję systemu monitorowania stanu pojazdu, opartą na pojedynczym przetworniku drgań na każdej ramie wózka, wyposażonego w czujnik żyroskopowy oraz inklinometr.

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] Firlik B., *Wpływ stanu zużycia profili szyn oraz geometrii toru na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego*, Rozprawa doktorska, Warszawa 2008.
- [2] Norma PN-70/H-93421, *Szyny normalnotorowe*.
- [3] Norma PN-92/H-93440, *Stal. Szyny tramwajowe z rowkiem*.