

**Rafał MELNIK**

Politechnika Warszawska  
Wydział Transportu, Projekt "MONIT"  
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa  
rme@it.pw.edu.pl

## **SYMULACYJNE BADANIE USZKODZEŃ ZAWIESZENIA POJAZDU SZYNOWEGO**

### **Streszczenie:**

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania pakietu symulacyjnego w ocenie stanu technicznego zawieszenia pojazdu szynowego. Badania symulacyjne przeprowadzono na zamodelowanym torze o dobrym stopniu utrzymania w celu uzyskania informacji o możliwości monitorowania stanu technicznego zawieszenia i detekcji jego uszkodzeń. Obiektami badań są wagony pasażerskie. Pierwszy z nich posiada sprężyny stalowe w zawieszeniu II stopnia, natomiast drugi sprężyny pneumatyczne odwzorowane za pomocą zaimplementowanego w programie modelu Nishimury. Uszkodzenia elementów podatnych i tłumiących zawieszenia zamodelowano poprzez redukcję współczynników sztywności oraz współczynników tłumienia.

Słowa kluczowe: pojazd szynowy, monitoring, zawieszenie

### **WPROWADZENIE**

W obecnych latach obserwuje się zwiększony nacisk na poprawę bezpieczeństwa (czynnego oraz biernego) środków transportu. Transport szynowy charakteryzujący się wysokim poziomem bezpieczeństwa również nie może oprzeć się temu trendowi, ponieważ i w jego przypadku dochodzi do tragicznych w skutkach katastrof. Na uwagę trzeba mieć również rosnące wymagania ze strony tworzenia nowych połączeń kolei dużych prędkości (Chiny) oraz zwiększania przewozów towarowych. Jednym ze sposobów na zwiększenie bezpieczeństwa czynnego jest stosowanie monitoringu stanu technicznego kluczowych, z punktu widzenia dynamiki jazdy, elementów pojazdu. Do tych elementów niewątpliwie zaliczają się elementy podatno-tłumiące zawieszenia, które mają duży wpływ na bezpieczeństwo biegowe. Pogorszenie parametrów tych elementów pojazdu skutkuje ograniczeniem własności dynamicznych, które mogą powodować szybsze zużywanie kół, szyn a także zmniejszenie bezpieczeństwa jazdy, co w skrajnych przypadkach może grozić wykolejeniem.

Korzyścią z zastosowania monitoringu stanu zawieszenia jest nie tylko poprawa bezpieczeństwa ale może być nią również ułatwienie eksploatacji pojazdu, gdyż dzięki systemowi zaistnieje możliwość lokalizacji elementów, których stan odbiega od nominalnego. Dzięki temu możliwa będzie racjonalna eksploatacja pojazdu oraz zwiększenie jego gotowości do pracy. Czynniki te przekładają się na zmniejszenie kosztów dla przewoźników w przypadku ewentualnych awarii bądź wypadków.

W związku z trudnościami w ocenie stanu zawieszenia w trybie on-line i braku takiego systemu do użytku komercyjnego, kwestia monitoringu stanu usprężynowania nie jest na razie obligatoryjna. Jednakże bezpieczeństwo w transporcie szynowym jest priorytetem stąd

też kwestia monitorowania stanu zawieszenia jest opracowywana przez wiele światowych ośrodków naukowych [1, 3, 6, 9].

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływ uszkodzeń elementów zawieszenia wagonu pasażerskiego występującego w dwóch wariantach zawieszenia II stopnia (pomiędzy nadwoziem a wózkiem): klasycznym (stalowe sprężyny śrubowe) oraz z zawieszeniem pneumatycznym.

### 1. UKŁAD ZAWIESZENIA MODELU POJAZDU

Zawieszenie (usprężynowanie) większości obecnie eksploatowanych wagonów pasażerskich składa się z dwóch stopni:

- Pierwszego – pomiędzy zestawami kołowymi i ramą wózka.
- Drugiego – pomiędzy ramą wózka i nadwoziem.

Rodzaj zawieszenia pierwszego stopnia (w tym dobór parametrów elementów podatno-tłumiących) oraz jego stan techniczny w znaczący sposób wpływa na zachowanie dynamiczne pojazdu, co przekłada się na jego bezpieczeństwo biegowe. Zadaniem drugiego stopnia zawieszenia jest zapewnienie odpowiedniego komfortu pasażerom przez izolację drgań przenoszonych przez zestawy kołowe i ramę wózka. Spośród wielu wymuszeń drgań w przypadku pojazdów szynowych można wymienić następujące źródła:

- Nierówności geometryczne toru.
- Elementy infrastruktury takie jak np. rozjazdy, miejsca styku szyn.
- Imperfekcje powierzchni tocznych kół – poligonizacje (płaskie miejsca).

Powyższe czynniki powodują konieczność utrzymania zawieszenia pojazdu w sprawnym stanie. Uszkodzenia usprężynowania pojazdu szynowego mają wpływ na nierównomierność rozkładu nacisków kół. Zjawisko to zwiększa tempo zużywania się obrzeży kół, pogarsza spokojność biegu oraz zmniejsza bezpieczeństwo przed wykolejeniem [8]. Z tych względów monitoring stanu zawieszenia dałby operatorom pojazdów szynowych nie tylko korzyści wynikające z poprawy bezpieczeństwa biegowego ale również sygnalizowałby moment, w którym należałoby dokonać wymiany uszkodzonych elementów.

W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych do oceny możliwości monitorowania stanu zawieszenia oraz jego oceny wykorzystano modele wagonu pasażerskiego, z zawieszeniem drugiego stopnia na sprężynach stalowych śrubowych oraz modelu, w którym nadwozie oparto na sprężynach pneumatycznych. Modele wózków wzorowane były na konstrukcji 25AN oraz 25ANp (z miechami pneumatycznymi), parametry nadwozia odpowiadają wagonom pasażerskim klasy Z. Do wykonania modeli wagonów i przeprowadzenia symulacji wykorzystano aplikację VI-RAIL będącą "kolejowym" modułem środowiska symulacyjnego typu MBS (Multibody simulation) MSC.ADAMS. Elementy pojazdów szynowych takie jak nadwozie, wózki, zestawy kołowe, elementy wodzące zawieszenia, itp. reprezentowane są w tym środowisku poprzez bryły sztywne o zadanych parametrach masowych (masy, momenty bezwładności). Bryły te połączone są za pomocą nieważkich elementów odwzorowujących elementy podatne (sprężyny) oraz tłumiki drgań. Charakterystyki sprężyn zawieszenia oraz tłumików przyjęto dla uproszczenia jako liniowe. Odwzorowując zachowanie sprężyny pneumatycznej zastosowano model matematyczny Nishimury. Opierając się na opisie termodynamicznym sprężyny uwzględnia on przy tym jej zmienną powierzchnię efektywną oraz empiryczny opis przepływu powietrza przez dyszę (linowa zależność pomiędzy różnicą ciśnienia i przepływającą masą powietrza).

Zachowanie mechaniczne modelu Nishimury opisane jest przy pomocy równania różniczkowego [4].

### 2. PROCEDURA SYSTEMU MONITOROWANIA

Procedura badań pojazdu szynowego pod względem bezpieczeństwa jazdy, właściwości dynamicznych układu biegowego i oddziaływania na tor, bazuje na wymaganiach zawartych w karcie UIC 518 [5] i normie EN 14363 [7]. Dokumenty zawierają wytyczne odnośnie badania pojazdów szynowych pod kątem bezpieczeństwa biegowego – pomiar przyspieszeń na ramie wózka, a także spokojności biegu – pomiar przyspieszeń na nadwoziu. Opracowywana w ramach projektu "MONIT" procedura monitorowania stanu zawieszenia pojazdu szynowego uwzględnia zawarte w powyższych dokumentach wytyczne dotyczące lokalizacji punktów pomiarowych oraz granicznych wartości przyspieszeń.

Przyjęta idea algorytmu oceny stanu zawieszenia I i II stopnia zakłada porównanie parametrów diagnostycznych dla rejestrowanych sygnałów przyspieszenia z odpowiednimi parametrami dla pojazdu w stanie nominalnym. Uszkodzenia elementów układu zawieszenia powodują zmiany sygnałów przyspieszenia co doprowadza do powstania różnic pomiędzy wartościami przyjętych miar sygnału wzorcowego oraz eksperymentalnego. Symptomaticznym będzie więc różnica pomiędzy tymi wartościami dla sygnału wzorcowego oraz sygnału eksperymentalnego.

Przyjęto, iż analiza sygnałów będzie przeprowadzana na sygnałach rejestrowanych na odcinkach o długości 1 km. Przyspieszenia rejestrowane są nad zestawami kołowymi na ramie wózka oraz na nadwoziu, nad środkiem ramy wózka. Spośród wielu parametrów diagnostycznych służących do oceny stanu elementów podatno-tłumiących dla sygnałów przyspieszenia wybrano wstępnie następujące parametry:

- Wartość skuteczna (RMS).
- Współczynnik zmienności.
- Wartość międzyszczytowa (Peak-to-Peak).
- Rozstęp kwartylny.
- Skośność.
- Kurtoza.
- Energia sygnału.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

Modele przebadano na torze prostym o dobrym stanie utrzymania (kategoria QN1 [5]). Symulacje przeprowadzono dla prędkości 80 i 160 km/h. Rozpatrywano następujące uszkodzenia elementów zawieszenia:

- Uszkodzenie sprężyny zawieszenia I i II stopnia.
- Uszkodzenie tłumika drgań zawieszenia I i II stopnia.

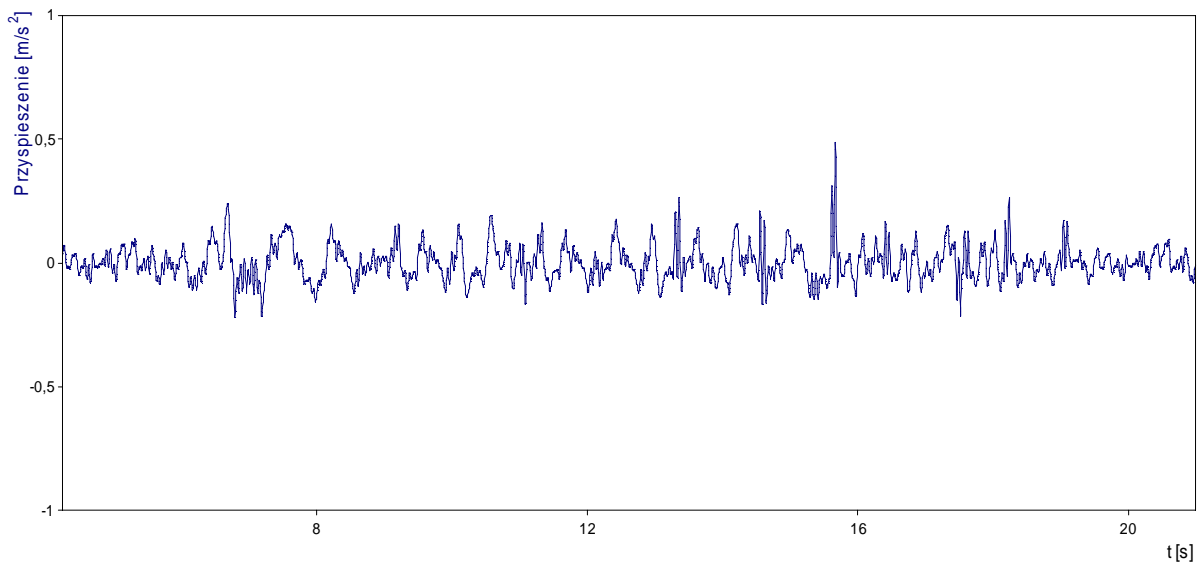
W przypadku uszkodzenia sprężyny pierwszego stopnia przyjęto współczynnik sztywności jako połowę sztywności dla pojazdu nominalnego. Reprezentuje to w uproszczeniu sytuację, w której pęknięciu uległa jedna z dwóch współosiowych sprężyn. Modelowanie uszkodzenia sprężyny II stopnia w przypadku pojazdu z klasycznym zawieszeniem jest identyczne jak dla I stopnia. Zawieszenie pneumatyczne w nowoczesnych pojazdach jest połączeniem miechów pneumatycznych i gumowo-metalowych sprężyn

podporowych, które wspomagają system zawieszenia w przypadku występowania naprężeń skrętnych oraz dużych skoków poziomych. Sprężyny metalowo-gumowe absorbują też część odkształceń pionowych oraz pełnią rolę zawieszenia awaryjnego w razie uszkodzenia układu zasilania powietrzem lub ulatniania się powietrza. Dla wagonu z zawieszeniem pneumatycznym, utrata powietrza z miecha nie powoduje całkowitej utraty sztywności, gdyż funkcję tę przejmują awaryjne sprężyny metalowo-gumowe [8]. Zawieszenie awaryjne zamodelowano jako sprężynę o liniowej charakterystyce. Awarię tłumika drgań zawieszenia I stopnia zamodelowano jako całkowitą utratę zdolności tłumiących – współczynnik tłumienia równy zero. W tabelicy 1 przedstawiono analizy statystyczne sygnałów przyspieszenia w kierunku pionowym (Z) oraz poprzecznym (Y) pojazdu w stanie nominalnym (bez uszkodzeń) oraz z uszkodzonym tłumikiem I stopnia ( $v = 80\text{km/h}$ ).

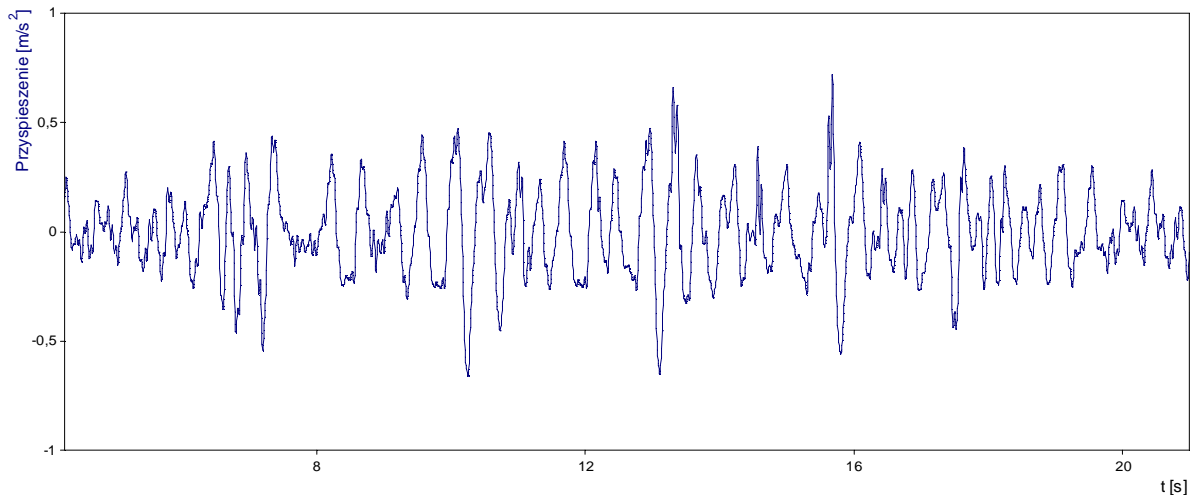
Tablica 1. Analiza statystyczna sygnałów przyspieszenia w kierunku Z i Y dla  $V = 80\text{ km/h}$  – uszkodzenie tłumika I stopnia.

<b>Prametr</b>	<b>Uszk. Z</b>	<b>Nom. Z</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>	<b>Uszk. Y</b>	<b>Nom. Y</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
RMS	0,557	0,368	51	0,505499	0,498	2
Wsp. zmien.	7,226	23,419	69	19,417	24,92	22
Peak to Peak	0,67	11,65	1098	0,85	11,83	1098
Rozstęp kw.	0,64	0,405	58	0,609	0,6	1
Skośność	-0,166	-0,080	108	-0,125	-0,115	8
Kurtoza	2,744	5,581	51	4,995	5,132	3
Energia	2524,95	1106,74	128	2083,31	2019,66	3

Przebiegi przykładowych przebiegów sygnałów przyspieszenia zarejestrowanych na pudle nad środkiem wózka przedstawiono na Rys.1 i Rys. 2 ( $v = 160\text{ km/h}$ ).



Rys. 1. Przebieg sygnału przyspieszenia na nadwoziu,  $v=160\text{ km/h}$ , pojazd sprawny.



Rys. 2. Przebieg sygnału przyspieszenia na nadwoziu,  $v=160$  km/h, uszkodzona sprężyna pneumatyczna.

Wartości parametrów diagnostycznych zastosowanych do wykrywania uszkodzenia zawieszenia pneumatycznego II stopnia przedstawiono w tablicach 2 i 3.

Tablica 2. Analiza statystyczna sygnałów przyspieszenia w kierunku Z i Y dla  $V = 80$  km/h - uszkodzenie sprężyny pneumatycznej II stopnia.

<b>Prametr</b>	<b>Uszk. Z</b>	<b>Nom. Z</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>	<b>Uszk. Y</b>	<b>Nom. Y</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
RMS	0,13	0,036	255	0,355	0,052	589
Wsp. zmien.	-89,385	36,419	345	-17,196	7,128	341
Peak to Peak	0,96	0,42	54	0,66	0,49	17
Rozstęp kw.	0,170	0,042	308	0,485	0,066	633
Skośność	-0,021	0,707	103	-0,059	0,225	126
Kurtoza	0,364	3,185	89	0,622	1,434	57
Energia	136,702	10,860	1159	1029,84	21,69	4648

Tablica 3. Analiza statystyczna sygnałów przyspieszenia w kierunku Z i Y dla  $V = 160$  km/h - uszkodzenie sprężyny pneumatycznej II stopnia

<b>Prametr</b>	<b>Uszk. Z</b>	<b>Nom. Z</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>	<b>Uszk. Y</b>	<b>Nom. Y</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
RMS	0,2	0,07	186	0,386	0,093	315
Wsp. zmien.	17,893	4,061	341	-6,045	4,753	227
Peak to Peak	0,53	0,71	18	0,86	0,72	14
Rozstęp kw.	0,256	0,083	208	0,545	0,114	380
Skośność	-0,022	0,719	103	-0,015	0,382	104
Kurtoza	0,345	2,275	85	-0,127	1,019	113
Energia	134,752	16,474	718	498,706	28,898	1626

W tablicach 4 i 5 zaprezentowano wartości parametrów diagnostycznych dla przypadku uszkodzonego zawieszenia II stopnia ze sprężynami śrubowymi.

Tablica 4. Analiza statystyczna sygnałów przyspieszenia w kierunku Z i Y dla  $V = 80$  km/h - uszkodzenie sprężyny stalowej II stopnia

<b>Prametr</b>	<b>Uszk. Z</b>	<b>Nom. Z</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>	<b>Uszk. Y</b>	<b>Nom. Y</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
RMS	0,042	0,049	14	0,058	0,06	3
Wsp. zmien.	-3,677	-2,873	28	-0,861	-22,885	96
Peak to Peak	0,4	0,46	6	0,83	0,76	7
Rozstęp kw.	0,052	0,061	15	0,07	0,072	2
Skośność	0,447	0,181	146	0,179	0,183	2
Kurtoza	1,329	0,917	45	2,775	3,249	15
Energia	14,202	19,206	26	27,551	29,201	6

Tablica 5. Analiza statystyczna sygnałów przyspieszenia w kierunku Z i Y dla  $V = 160$  km/h - uszkodzenie sprężyny stalowej II stopnia

<b>Prametr</b>	<b>Uszk. Z</b>	<b>Nom. Z</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>	<b>Uszk. Y</b>	<b>Nom. Y</b>	<b><math>\Delta</math> [%]</b>
RMS	0,072	0,07	2	0,092	0,093	1
Wsp. zmien.	-4,788	4,061	218	-1,061	4,753	122
Peak to Peak	0,6	0,65	5	0,93	0,78	15
Rozstęp kw.	0,093	0,083	11	0,109	0,114	4
Skośność	0,504	0,719	30	0,430	0,382	13
Kurtoza	0,891	2,275	61	1,288	1,019	26
Energia	17,231	16,474	5	28,257	28,898	2

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania symulacyjne miały na celu ocenę możliwości monitorowania stanu elementów podatnych i tłumiących zawieszenia I i II stopnia pojazdów szynowych. W porównaniu wykorzystano modele wagonów pasażerskich różniących się rodzajem zawieszenia II stopnia usprężynowania.

Nie we wszystkich rozpatrywanych przypadkach zauważalna jest zależność taka, że pogorszenie parametrów tłumienia bądź sztywności powoduje wzrost wskaźnika diagnostycznego. W większości przypadków moduł kurtozy oraz skośności dla pojazdu z uszkodzeniem jest mniejszy niż dla tego samego pojazdu w sprawnym stanie.

Dla przypadku uszkodzonego tłumika I stopnia (całkowitej utraty tłumienia) można zauważyć, iż procentowa zmiana wskaźników diagnostycznych wynosi od ok. 50 do 1000%. Jednak w ostatnim przypadku tak duża zmiana może być następstwem natury parametru wartości międzyszczytowej, która jest stosunkiem amplitud sygnału, czego przyczyną mogą być lokalnie duże nierówności toru powodujące pojawienie pików o zwiększonej wartości. Niemniej zmiany wskaźników są dość znaczne.

Uszkodzenie sprężyny pneumatycznej, pomimo działania sprężyn awaryjnych, również powoduje duże zmiany wskaźników diagnostycznych. Awaria sprężyny pneumatycznej manifestuje się także dla sygnałów mierzonych w kierunku poprzecznym (Y). Zarówno dla prędkości 80 km/h jak i 160 km/h parametrem, który zmieniał się w największym stopniu jest energia sygnału.

Porównując możliwość wykrywania uszkodzeń zawieszenia II stopnia, na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych, można stwierdzić, że zmniejszenie sztywności o połowę jest trudniejsze do stwierdzenia. Tylko w przypadku współczynnika zmienności można mówić o znacznej zmianie wskaźnika, zarówno dla kierunku Z jak i Y. Pozostałe parametry zmieniają się nieznacznym stopniu, co utrudnia detekcję tego uszkodzenia.

Spośród przedstawionych parametrów diagnostycznych, po analizie wyników badań symulacyjnych, można stwierdzić, że istotną informację diagnostyczną niosą ze sobą:

- Wartość skuteczna (RMS).
- Współczynnik zmienności.
- Rozstęp kwartylny.
- Energia sygnału.

Parametry te mogą być zaimplementowane w systemie monitorowania w celu sygnalizacji nieprawidłowości działania układu zawieszenia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bruni S., Goodall R., Mei T. X., Tsunashima H.: Control and monitoring for railway vehicle dynamics', *Vehicle System Dynamics*, 45: 7, 743 — 779, 2007.
- [2] Chudzikiewicz A.: Elementy diagnostyki pojazdów szynowych, Warszawa: Politechnika Warszawska, Radom: Instytut Technologii Eksploatacji, 2002.
- [3] Chudzikiewicz A., Sowiński B., Szulczyk A.: Statistical parameter of vibrations as measures of rail vehicle condition, *The 17th International Congress of Sound and Vibration*, Cairo 18 – 22 July, 2010.
- [4] Dokumentacja aplikacji VI-RAIL.
- [5] Karta UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality.
- [6] Mei T. X., Ding X. J.: Condition monitoring of rail vehicle suspensions based on changes in system dynamic interations, *Vehicle System Dynamics*, 47: 9, 1167 – 1181, 2009.
- [7] Norma EN 14363: Railway applications - Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Testing of running behaviour and stationary tests.
- [8] Raport 3/5 projektu "MONIT": Opracowanie wymagań dla systemu monitorowania pojazdu kolejowego typu pojazd napędny, Warszawa, 2010.
- [9] Sakellariou J.S., Petsounis K.A., Fassois S.D. 2002. On Board Fault Detection and Identification in Railway Vehicle Suspensions via a Functional Model Based Method, *International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, 16-18 Sept, 2002.

**Adknowledge:** Praca została wykonana ramach projektu badawczego MONIT - Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności. Program Operacyjny - Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Poddziałanie 1.1.2 - Strategiczne programy badań naukowych i prac rozwojowych.

## SIMULATION STUDY OF DAMAGES OF A RAIL VEHICLE SUSPENSION

### Abstract:

This paper presents a usage of simulation software in evaluation of technical state of rail vehicle's primary and secondary suspension. The simulations have been performed on track of good maintenance in order to provide some information on possibility of monitoring technical state of suspension and fault detection. The objects of this study are two passenger cars with different type of secondary suspension: The first with body suspended on coil springs and the second with air springs. The air springs used in simulation are represented by Nishimura model. The faults considered are loss of damper in primary suspension and stiffness reduction in secondary suspension.

Key words: rail vehicle, monitoring, suspension