

## MONITOROWANIE STANU AMORTYZATORÓW KOLEJOWYCH

Wojciech POPRAWSKI

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej  
Ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, POLSKA, fax +48(71)3280670  
Wojciech.Poprawski@pwr.wroc.pl

### Streszczenie

Przedstawiono prace nad systemem monitorowania stanu technicznego amortyzatorów kolejowych. Niektóre z amortyzatorów są szczególnie odpowiedzialne za stabilność wózka podczas jazdy z dużymi prędkościami. Zastosowanie monitorowania stanu może zwiększyć bezpieczeństwo jazdy pociągu oraz zredukować czas i koszty napraw. W systemie podejmowania decyzji została zastosowana sieć neuronowa (backpropagation).

Słowa kluczowe: amortyzatory, monitorowanie stanu, sieci neuronowe.

### CONDITION MONITORING OF RAILWAY SHOCK ABSORBERS

#### Summary

The paper presents the study on condition monitoring system of railway shock absorbers. The anti-yaw dampers have been chosen to apply the condition monitoring system. The application of condition monitoring system can increase safety of the train as well as reduce maintenance, service time and idle costs of the trains. The backpropagation neural network has been chosen for the decision making system.

Keywords: shock absorbers, condition monitoring, neural networks.

## 1. WPROWADZENIE

Pomysł opracowania systemu monitorowania stanu technicznego kolejowych amortyzatorów przeciwdziałających wężkowaniu jest wynikiem rozmów prowadzonych przez firmę *KONI B.V.* i operatora szybkich pociągów *ICE II*, niemieckiego przewoźnika - *Deutsche Bahn*.

Amortyzatory przeciwdziałające wężkowaniu odpowiedzialne są za redukcję ruchu wózka wokół jego pionowej osi, spowodowanego wężkowaniem zestawów kołowych. Niedostateczne tłumienie tego ruchu może być niebezpieczne dla stabilnego ruchu pociągu, powodując w skrajnych przypadkach wykolejenie. Przeciwdziałać temu może monitorowanie stanu technicznego amortyzatorów przeciwdziałających wężkowaniu. Mechanik prowadzący pociąg zostanie poinformowany o stanie amortyzatorów i tym samym podejmie stosowne decyzje, takie jak obniżeniu prędkości poniżej wartości krytycznej.

Dotychczas amortyzatory kolejowe poddawane są kontroli technicznej zgodnie z harmonogramem uwzględniającym przebieg pociągu. Podczas takich badań pociąg jest wycofywany z eksploatacji. Następnie wymontowane amortyzatory poddawane są badaniom przeprowadzonym według znormalizowanych procedur. Badania takie są pracochłonne, ponadto są przyczyną generowania kosztów związanych z przestojami pociągu.

Zastosowanie systemu monitorowania może przyczynić się do znacznych oszczędności, ponieważ wymianie podlegać będą tylko uszkodzone amortyzatory, a nie tak jak dotychczasowo wszystkie amortyzatory, które używane były przez określony przez producenta czas. Uniknie się także kosztów przeglądów amortyzatorów.

Podczas ruchu pociąg narażony jest na wymuszenia dynamiczne związane z ruchem wzdłuż torowiska. Niektóre z tych źródeł wymuszeń mają przypadkowy charakter, związane są na przykład ze stanem torowiska, ze stanem obręczy kół itp. Istnieją także okresowe wymuszenia. Jednym z takich wymuszeń jest tzw. *ruch wężkowania*. Jest on szeroko opisany w literaturze [1]. Ruch wężkowania związany jest z toceniem zestawu kołowego po torowisku. Dla uproszczenia, zestaw kołowy można wyobrazić sobie jako dwa stożki połączone podstawami, przetaczające się po równoległych szynach. Zakłócenie może spowodować przesunięcie się zestawu kołowego, a tym samym, jedno z kół, na przykład lewe, będzie toczyło się po okręgu o mniejszej średnicy, podczas gdy drugie, prawe, będzie się toczyło po okręgu o większej średnicy. Spowoduje to przesuwanie się całego zestawu kołowego w lewą stronę, aż do momentu, kiedy kółko koła uderzy w główkę szyny. W tym momencie zmienia się kierunek ruchu aż do momentu, gdy drugie koło uderzy w główkę szyny. Długość 'fali' takiego ruchu jest zależna od

parametrów geometrycznych zestawu kołowego, takich jak stożkowość koła, rozstaw szyn, średnica kół, a także parametrów fizycznych, takich jak współczynnik tarcia pomiędzy szyną a obręczą koła.

Ruch wężykowania może być częściowo zredukowany poprzez zastosowanie usprężynowania pierwszego stopnia w układzie zawieszenia wagonu czy lokomotywy. Jednak w szybkich pociągach pasażerskich stosuje się specjalne amortyzatory przeciwdziałające wężykowaniu, które sprawdzają się zwłaszcza podczas poruszania się pociągu z wysokimi prędkościami.

Wózki wagonowe pociągów typu *ICE II* wyposażone są w cztery amortyzatory przeciwdziałające wężykowaniu. Zamontowane one są parami po każdej stronie wózka. Równoległe zastosowanie dwóch amortyzatorów przeciwdziałających wężykowaniu z każdej strony wózka świadczy o wadze problemu tłumienia tego ruchu. Zastosowanie podwójnych amortyzatorów pozwala na osiągnięcie większej sztywności i dodatkowo pozwala na zabezpieczenie pociągu przed skutkami wywołanymi ewentualnym uszkodzeniem amortyzatora.

## 2. WŁAŚCIWOŚCI AMORTYZATORÓW

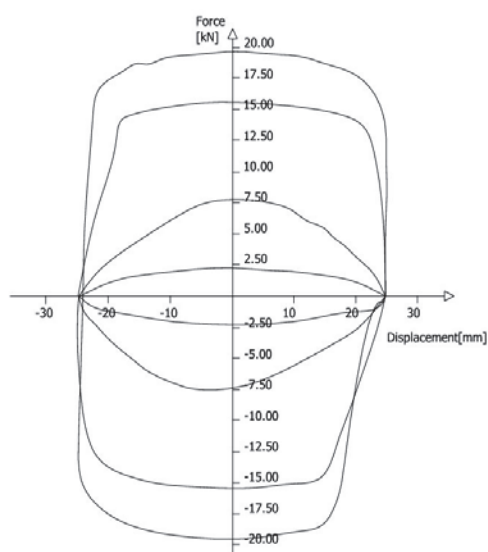
Amortyzatory hydrauliczne są złożonymi urządzeniami, służącymi do rozpraszania energii mechanicznej.

W amortyzatorze hydraulicznym olej przepływa przez system zwężek, zaworów dławiących i zwrotnych, które kształtują charakterystykę. Amortyzatory kolejowe produkcji firmy KONI posiadają specyficzną zasadę działania. W amortyzatorach stosowanych w kolejnictwie pożądane jest, aby charakterystyka była symetryczna, tzn. siła tłumienia wytwarzana w kierunkach sprężania i rozprężania, dla tych samych wartości prędkości w obu kierunkach była taka sama (w przeciwieństwie do amortyzatorów stosowanych w pojazdach samochodowych, gdzie jest niesymetryczna). Aby zapewnić symetrię charakterystyki podczas ruchu sprężania i rozprężania olej przepływa w tym samym kierunku przez zawór dławiący, podczas gdy wytworzone ciśnienie działa na takiej samej powierzchni.

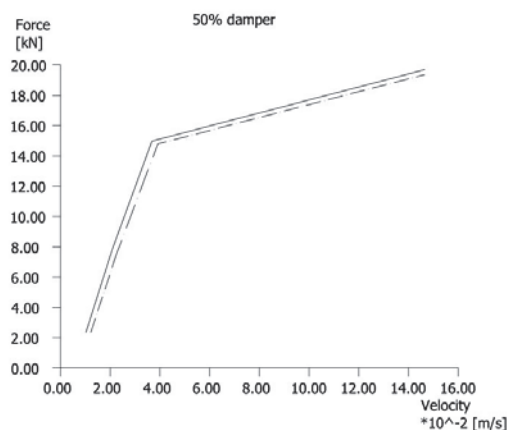
Zachowanie się i właściwości amortyzatorów przedstawiane są na wykresach siły i prędkości, które traktowane są jako ich charakterystyki. Metody otrzymywania charakterystyk są znormalizowane i opisane na przykład w PN-K-88203:1996, NF F 01-411:1995 lub w projekcie Normy Europejskiej prEN13802. Normy przedstawiają przebieg pomiarów i obliczeń potrzebnych do utworzenia charakterystyki.

Badania potrzebne do utworzenia charakterystyki prowadzone są w laboratorium wyposażonym w odpowiednią aparaturę pomiarową. Amortyzator powinien być mocowany w sposób odpowiadający mocowaniu w układzie zawieszenia pociągu (poziomo lub pionowo). Następnie układ hydrauliczny urządzenia pomiarowego wymusza

ruch tłoka amortyzatora względem cylindra. Najczęściej stosuje się wymuszenie ruchem sinusoidalnym, o określonej amplitudzie (dla amortyzatorów kolejowych najczęściej stosuje się amplitudę 25mm). Częstotliwość zależy od zakresu prędkości, który chcemy uwzględnić na charakterystyce i od możliwości użytej maszyny pomiarowej. Na początku przygotowywane są wykresy zależności siły od przemieszczenia. Na ich podstawie otrzymywane są wykresy zależności siły od prędkości: dla określonej częstotliwości odnotowywana jest maksymalna wartość siły tłumienia dla maksymalnej prędkości. Zmieniając częstotliwość tego ruchu zmieniamy maksymalną wartość prędkości. Wartości maksymalnej prędkości i siły odznaczane są na wykresach. Przykładowe wykresy zależności siły od przemieszczenia i siły od prędkości przedstawione są na rysunkach 1 i 2.



Rys.1: Wykres zależności siły od przemieszczenia



Rys. 2: Wykres zależności siły od prędkości (linia przerywana – ruch sprężania)

### 3. PRACE NAD SYSTEMEM MONITOROWANIA STANU AMORTYZATORÓW

Prace nad systemem monitorowania stanu amortyzatorów kolejowych zostały rozpoczęte w 1998 roku przez Kars'a i Wyes'a [2]. W pracy tej przedstawiono korzyści i oszczędności, które może przynieść zastosowanie systemu monitorowania stanu.

Niniejsza praca przedstawia proces projektowania systemu monitorowania stanu amortyzatorów, od wyboru wielkości mierzonych do propozycji systemu wnioskującego.

Aby otrzymać informacje o stanie i zachowaniu się amortyzatorów w celu rozróżnienia amortyzatorów sprawnych od uszkodzonych, należy je wyposażyć w odpowiednie czujniki. Podczas badań użyto tensometrów zamocowanych do tłoczków. Widok tłoczyska wyposażonego w tensometr przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Tensometr zamocowany do tłoczyska amortyzatora (pod metalową osłoną)

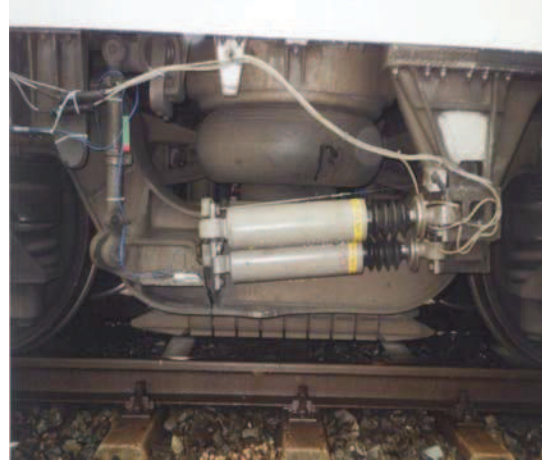
Aby mierzyć wielkości opisujące zachowanie się amortyzatora niezbędne także było zastosowanie czujników przemieszczenia, mierzących względne przemieszczenie tłoka względem cylindra. Widok czujników przemieszczenia oraz okablowanie zastosowane podczas badań wózka wagonowego podczas jazdy przedstawiono na rysunku 4.

Wyniki pomiarów zarejestrowanych podczas jazdy pociągu (przemieszczenie – ruchu względnego tłoka i cylindra oraz siła) zostały użyte w celu odtworzenia „profilu drogi” w warunkach laboratoryjnych. Odtworzenie warunków obciążenia amortyzatorów panujących podczas jazdy pociągu było konieczne, ponieważ warunki, przy których wyznacza się charakterystyki znacząco różnią się od rzeczywistych warunków panujących podczas jazdy.

W badaniach wykorzystano stanowisko SERVOTEST, wyposażone w maszynę pomiarową oraz w komputer z oprogramowaniem sterującym napędem członu czynnego maszyny. Oprogramowanie pozwala na odtworzenie dowolnego profilu drogi. W tym celu wykorzystano

zarejestrowane uprzednio dane pomiarowe. Odtworzono warunki zbliżone do warunków obciążenia panujących podczas jazdy pociągu.

Podczas badań laboratoryjnych rejestrowano sygnały siły działającej na tłoczek, przemieszczenie względne tłoka i cylindra oraz względną prędkość tłoka i cylindra.



Rys. 4. Widok amortyzatorów zamocowanych do wózka pociągu I.C.E. II, widok czujników oraz okablowania

Aby skutecznie zaprojektować system monitorowania stanu amortyzatorów, należało przeprowadzić badania amortyzatorów sprawnych oraz uszkodzonych.

Do symulacji wybrano rodzaje uszkodzeń, które mogą być najczęstszą przyczyną niesprawności amortyzatorów. Ich przyczyną jest zwykle obecność zanieczyszczenia w oleju amortyzatora. Niewielki opiłek może przyblokować zawory zwrotne lub zmniejszyć przekroje zwężeń w zaworach dławiących.

W trakcie badań amortyzatorów z zasymulowanymi uszkodzeniami odtwarzano zarejestrowany uprzednio sygnał przemieszczenia. W wyniku analizy wyników badań dowiedziono, że punkty utworzone przez pary wartości chwilowych siły i prędkości, na płaszczyźnie tworzą różne kształty dla amortyzatorów sprawnych i uszkodzonych. Powyższe własności wykorzystano przy projektowaniu systemu monitorowania stanu amortyzatorów przeciwdziałających wężykowaniu.

### 4. SYSTEM WNISKOWANIA

System wnioskowania jest jednym z ważniejszych elementów systemów monitorowania stanu czy diagnostyki.

W proponowanym systemie wnioskowania zastosowano algorytmy oparte na metodach rozpoznawania obrazu. Wykresy na płaszczyźnie siły i prędkości, przygotowane na podstawie zmierzonych w warunkach laboratoryjnych dla różnych amortyzatorów, z zasymulowanymi uszkodzeniami przedstawione są w tabeli 1. Tabela zawiera także opis symulowanych uszkodzeń (siedem przypadków).



#### 4.1. Przygotowanie danych

Procedura opracowania wyników, w celu otrzymania obrazów 'czarno-białych', składała się z następujących kroków:

- Rejestrowanie danych, siły i prędkości.
- Podział płaszczyzny *siły i prędkości* na siatkę (zakres siły:  $\pm 5$ [kN], zakres prędkości:  $\pm 30$ [mm/s]).
- Zliczanie punktów występujących w poszczególnych polach siatki, obliczanie wartości progowej w celu utworzenia 'czarno-białego' obrazu, w taki sposób, aby około 16% powierzchni rysunku była czarna.

#### 4.2. Projekt systemu wnioskowania

Większość systemów rozpoznawania wzorca oparta jest na Sztucznych Sieniach Neuronowych. Sieci neuronowe są także często wykorzystywane w systemach diagnostycznych różnych maszyn i procesów.

Sieci neuronowe znalazły zastosowanie w systemie diagnostycznym amortyzatorów używanych w pojazdach wojskowych [3], ale przedstawiony system oceniał stan amortyzatorów wymontowanych z pojazdu i testowanych na specjalnym stanowisku pomiarowym. Przedstawiona metoda nie może być jednak zastosowana w systemie działającym w trybie *on-line*.

W przedstawionym w niniejszej pracy systemie monitorowania stanu amortyzatorów kolejowych zastosowano sieć neuronową typu *back-propagation*. Sieć neuronowa tego typu jest szeroko opisana w literaturze dotyczącej problematyki sieci neuronowych.

Zastosowana sieć neuronowa zbudowana została z wykorzystaniem jednej warstwy ukrytej. Składała się z:

- 240 neuronów w *warstwie wejściowej*,
- 25 neuronów w *warstwie ukrytej*,
- 5 neuronów w *warstwie wyjściowej*.

Użyto sigmoidalnej funkcji aktywacji neuronu. Oznacza to, że wartości wyjściowe są w przedziale (0,1).

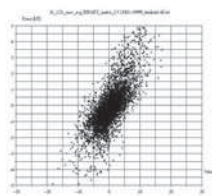
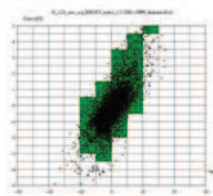
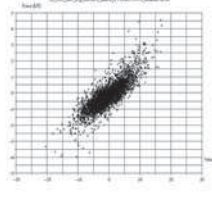
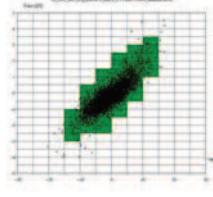
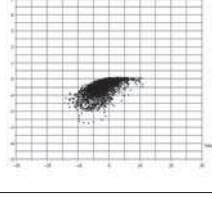
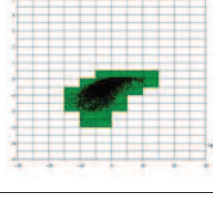
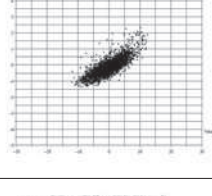
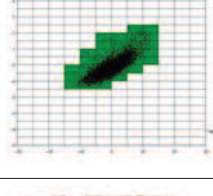
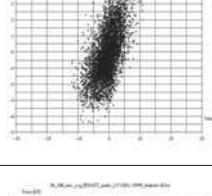
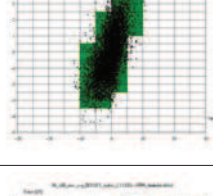
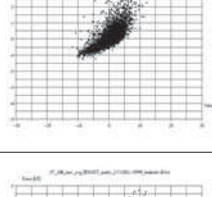
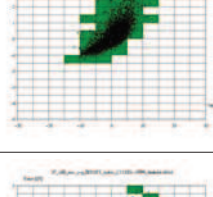
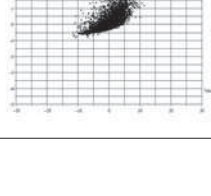
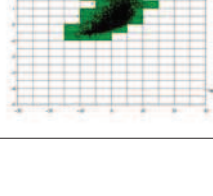
Uczenie sieci neuronowej jest bardzo długotrwałym procesem. Niektóre parametry sieci, takie jak liczba neuronów w warstwie ukrytej, parametry uczenia sieci czy liczba epok (powtórzeń cykli uczących) została określona na podstawie prób i błędów.

#### 4.3. Uczenie sieci neuronowej

Aby skutecznie nauczyć sieć neuronową rozpoznawać przedstawiane wzorce, należy przygotować odpowiednie zbiory uczące, składające się z przedstawianego wzorca oraz oczekiwanych wartości – celów.

Zastosowana sieć neuronowa składa się z 5 neuronów w warstwie wyjściowej. Taki rodzaj wektora wyjściowego uwarunkowany jest zastosowaną sigmoidalną funkcją aktywacji neuronu.

Tab. 1. Wykresy zależności *siły* od *prędkości*, przed i po przetworzeniu, z uwzględnieniem oznaczenia badanego amortyzatora

Nieprzetworzone dane	Ozn. amortyzatora	Dane po przetworzeniu - binaryzacji
	#01	
	#02	
	#03	
	#04	
	#05	
	#06	
	#07	

W tabeli 1 przedstawiono wykresy siły i prędkości, przed i po dokonaniu 'binaryzacji'. Natomiast w tabeli 2 przedstawiono rodzaje uszkodzeń, podział na grupy, ze względu na wpływ symulowanego uszkodzenia na stabilność ruchu pociągu oraz przypisany wektor wyjściowy, użyty podczas uczenia sieci neuronowej.

Testowane amortyzatory podzielono na pięć grup ze względu na wpływ uszkodzenia na stabilność ruchu pojazdu:

- Grupa 1: Amortyzatory działają prawidłowo, brak zagrożenia dla bezpieczeństwa pociągu.
- Grupa 2: Amortyzatory nie pracują prawidłowo, jednak jest brak zagrożenia dla ruchu pociągu. Amortyzatory powinny zostać wymienione podczas najbliższego przeglądu pociągu.
- Grupa 3: Amortyzatory wytwarzają zbyt dużą siłę tłumiącą. Pociąg jest bezpieczny, jednak amortyzatory powinny zostać wymienione.
- Grupa 4 i Grupa 5: Amortyzatory nie pracują prawidłowo. Powinny zostać wymienione przy najbliższej okazji.

Tab. 2. Oznaczenia amortyzatorów, opis uszkodzeń, podział na grupy, przypisany wektor wyjściowy

Ozn. amortyzatora	Opis uszkodzenia	Grupa	Wektor wyjściowy
#01	Sprawny amortyzator, nominalna charakterystyka	Grupa 1	[1,0,0,0,0]
#02	Przestrojony amortyzator, niższa siła tłumienia	Grupa 2	[0,1,0,0,0]
#03	Usunięty zawór zwrotny tłoka	Grupa 4	[0,0,1,0,0]
#04	Mniejsza zwężka w zaworze dławiącym	Grupa 3	[0,0,0,1,0]
#05	Większa zwężka w zaworze dławiącym	Grupa 2	[0,1,0,0,0]
#06	Zablokowany zawór zwrotny w 'stopie' amortyzatora, h=0,09mm	Grupa 2	[0,1,0,0,0]
#07	Zablokowany zawór zwrotny w 'stopie' amortyzatora, h=0,14mm	Grupa 5	[0,0,0,0,1]

Wektory wejściowe do sieci neuronowej zostały zbudowane z trzech pierwszych sekcji zarejestrowanych podczas badań po opisanej wyżej obróbce – binaryzacji. Czwarta sekcja została wykorzystana podczas testowania nauczonej sieci neuronowej.

## 5. TESTOWANIE SIECI NEURONOWEJ

Testowanie sieci neuronowej zostało przeprowadzone z wykorzystaniem czwartych sekcji danych pomiarowych (w procesie uczenia wykorzystano trzy pierwsze sekcje zarejestrowanych danych siły i prędkości).

Wyniki testowania, rozpoznawania są przedstawione w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki testowania sieci neuronowej

Oznaczenie amortyzatora	wynik (wartości uzyskane przez sieć neuronową)	Przyporządkowanie do grupy:
#01	[0.99,0.01,0.01,0.01,0.00]	Grupa 1
#02	[0.00,0.95,0.00,0.00,0.01]	Grupa 2
#03	[0.01,0.00,0.99,0.00,0.00]	Grupa 3
#04	[0.01,0.99,0.00,0.00,0.00]	Grupa 2
#05	[0.00,0.01,0.02,0.97,0.00]	Grupa 4
#06	[0.00,0.98,0.00,0.00,0.01]	Grupa 2
#07	[0.00,0.01,0.01,0.00,0.97]	Grupa 5

## 6. DALSZY BADANIA

W pracy przedstawiono algorytm, przy pomocy którego można rozpoznać stan amortyzatorów, który jest określony na podstawie analizy sygnałów siły i prędkości zarejestrowanych podczas odtwarzania profilu drogi w warunkach laboratoryjnych.

Dalsze prace nad projektem systemu monitorowania stanu amortyzatorów powinny być skoncentrowane na doborze odpowiednich czujników, które mogłyby mierzyć wielkości siły i prędkości podczas jazdy pociągu bez zbytnej ingerencji w zasadę działania amortyzatora.

Należy opracować także odpowiedni układ elektroniczny, który będzie odpowiedzialny za rejestrowanie danych i dokonywanie obliczeń przedstawionych w pracy. System powinien dostarczać informacje o stanie amortyzatorów do centralnego układu sterowania pociągu oraz do mechanika obsługującego pociąg. Na podstawie tych informacji, w razie awarii amortyzatora, mechanik podejmuje decyzję, która może zapobiec katastrofie.

## 7. WNIOSKI

Przedstawiony algorytm systemu monitorowania stanu amortyzatorów przeciwdziałających wężkowaniu skutecznie rozpoznaje przedstawiane dane pochodzące z różnych amortyzatorów z zasymulowanymi uszkodzeniami. Struktura algorytmu jest łatwa w implementacji dla systemu działającego w trybie on-line. Przedstawiony system może podnieść bezpieczeństwo pociągu oraz obniżyć koszty eksploatacji, poprzez wyeliminowanie okresowych przeglądów amortyzatorów.

## LITERATURA

- [1] K. Knothe and F. Böhm. History of stability of railway and road vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 31(5-6):pp.283–323, June 1999
- [2] J.W. Kars and H. Wyes. Elektronische Überwachung der Dämpferkraft bei modernen Hochgeschwindigkeitszügen. *ZEV+DET Glas. Ann.*, 122:556–562, September/Oktober 1998.
- [3] P. Sincebaugh, W. Green and G. Rinkus. A neural network based diagnostic test system for armoured vehicle shock absorbers. *Expert Systems With Applications*, 11(2):237–244, 1996.
- [4] W. Poprawski, J.W.Kars, J. Krzyżanowski *Intelligent Damping: Condition Monitoring of Railway Shock Absorbers*, Proceedings of ISMA2004 conference, Leuven, Belgium, 2004.
- [5] W. Poprawski *Monitoring of Energy Dissipation in Hydraulic Shock Absorbers*, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji. Wrocław 2004



---

Dr inż.

Wojciech POPRAWSKI ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Był stypendystą Marie Curie w firmie KONI B.V. w Holandii. Pracuje w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się dynamiką, obrabiarkami, systemami wytwórczymi oraz diagnostyką.