

## Dynamika i diagnostyka pojazdu z zaburzoną symetrią

Artykuł dotyczy zagadnień związanych z dynamiką i diagnostyką pojazdu szynowego z zaburzoną symetrią. Autorzy prezentują efekty dynamiczne, które mogą powodować zaburzenia symetrii pojazdu szynowego. Powodowane one są asymetrią elementów podatnych zawieszenia bądź niesymetrycznym rozmieszczeniem ładunku. W drugiej części pracy zaprezentowana została metoda diagnozy pojazdu szynowego, wykorzystująca efekty dynamiczne powodowane zaburzeniem symetrii.

### 1. Wstęp

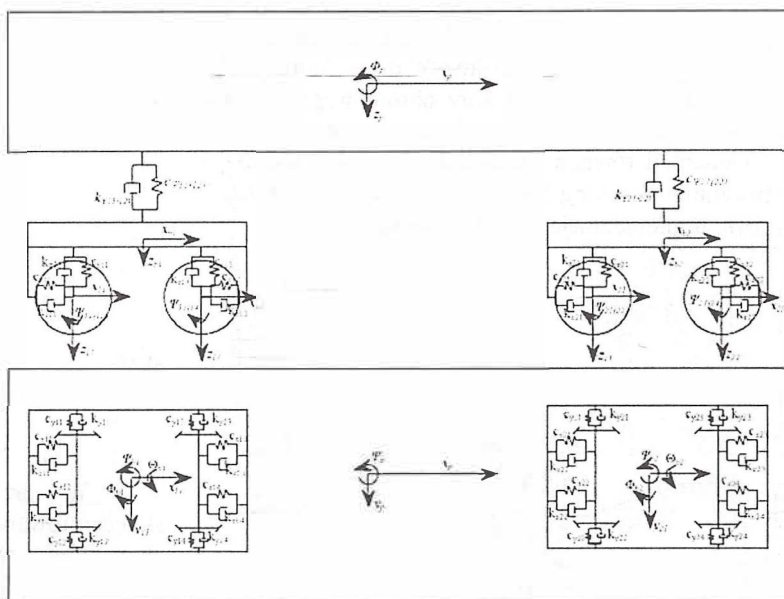
Zagadnienie zaburzenia symetrii konstrukcji pojazdów szynowych nie było specjalnie przedmiotem analiz badaczy. W większości prac dotyczących pojazdów szynowych analizowany jest pojazd szynowy (wagon lub pojazd trakcyjny) przy założeniu idealnej symetrii konstrukcji. Asymetria konstrukcji może tymczasem powodować znaczące efekty dynamiczne. Asymetria może polegać między innymi na asymetrii elementów podatnych, asymetrii rozmieszczenia masy pojazdu, asymetrii geometrii (np. kół). Powodowana ona może być wieloma czynnikami jak np.: procesami zużycia (czy wręcz awarii jednego z elementów), nierównomiernym rozłożeniem ładunku, asymetrią konstrukcji itd. Efekty powodowane asymetrią mogą wymagać zastosowania specjalnych metod modelowania.

Taki sposób modelowania zaprezentowany został w pracy [6], w której autor wprowadził tzw. współczynnik asymetrii. W większości jednak przypadków modelowanie nie wymaga zastosowania specjalnych technik. Wykorzystane są pakiety do automatycznej generacji równań ruchu [2] a efekty związane z asymetrią analizowane są poprzez porównanie wyników symulacji komputerowej z układu symetrycznego i asymetrycznego. Celem wykazania różnic wprowadzana jest często tzw. funkcja wrażliwości na efekty niesymetryczne. Taki sposób podejścia do rozwiązania problemu przedstawiony został w pracy [1]. Literatura pokazuje, że często problem analizy efektów asymetrii, jest bardziej problemem postawienia celu badań, niż wyboru szczególnych metod badawczych. W artykule przedstawiono kolejną fazę badań prowadzonych przez autorów w temacie modelowania, symulacji i diagnozowania nietrakcyjnego pojazdu szynowego z zaburzoną symetrią [3], [4], [5]. Jak w poprzednich etapach, do badań autorzy wybrali pojazd szynowy w ruchu po torze prostym. Skupiono się na tzw. dynamice poprzecznej [8]. Obejmuje ona zjawiska związane z oddziaływaniem kół zestawów kołowych z

główkami szyn, co jak wiadomo jest problemem niezwykle istotnym w badaniu dynamiki pojazdu szynowego. Do opisu tych zjawisk wykorzystano liniową teorię J. J. Kalkera [7]. Powstały model, opisany w punkcie drugim, został poddany procesowi symulacji komputerowej. Wyniki symulacji modelu symetrycznego porównane zostały z wynikami symulacji analogicznego modelu z zaburzoną symetrią. W punkcie 4 autorzy zaproponowali koncepcję diagnostyki analizowanego układu. Efekty dynamiczne związane z asymetrią przyjęto jako podstawę do identyfikacji uszkodzonego elementu oraz stopnia jego zużycia. Do rozwiązania zagadnienia diagnozowania wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.

### 2. Model nominalny

Rozważania zostaną ograniczone do uproszczonego modelu nietrakcyjnego pojazdu szynowego, składającego się z dwóch dwuosioowych wózków prowadzonych w sztywnych ramach (rys. 1). Zestawy kołowe z ramami oraz wózki z pudłem wagonu połączone są nieważkimi łącznikami sprężysto-tłumiącymi. Do opisu obiektu przyjęto prawoskrętny układ współrzędnych  $O_{xyz}$  (pojazd

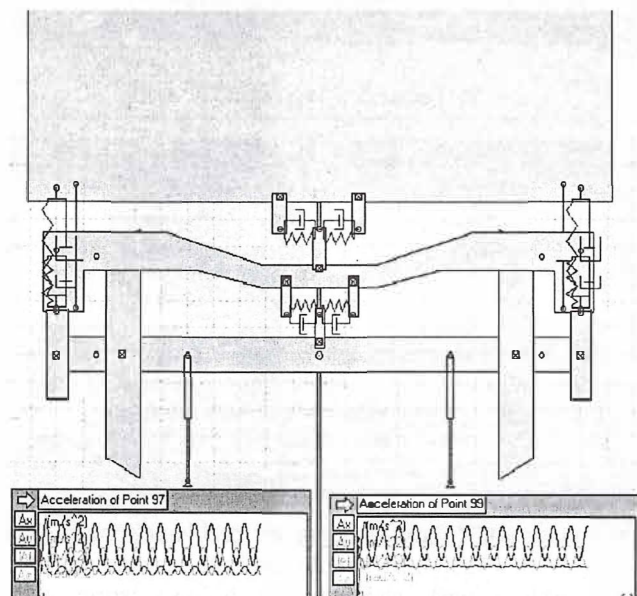


Rys. 1 Model nominalny zestawu nietrakcyjnego pojazdu szynowego; przyjęty układ współrzędnych i kąty obrotu (rzut z boku i dołu)

Lp.	Symbol	Określenie	Wartość
1.	$\Theta_{ij}, \Phi_{ij}, \Psi_{ij}$	kąt obrotu wokół osi odpowiednio $OX_{ij}, OY_{ij}, OZ_{ij}$ (układ $O_{XYZ}$ – prawoskrętny)	[rad]
2.	$c_{zij}$	współczynnik tłumienia j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OZ	$1,05E^5$ [Ns/m]
3.	$c_{yij}$	współczynnik tłumienia j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OY	$1,05E^5$ [Ns/m]
4.	$c_{xij}$	współczynnik tłumienia j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OX	$1,05E^5$ [Ns/m]
5.	$k_{zij}$	współczynnik sztywności j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OZ	$4,55E^7$ [N/m]
6.	$k_{yij}$	współczynnik sztywności j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OY	$4,55E^7$ [N/m]
7.	$k_{xij}$	współczynnik sztywności j-tego elementu sprężysto-tłumiącego między i-tym zestawem kołowym a ramą wózka wzdłuż osi OX	$4,55E^7$ [N/m]

porusza się ze stałą prędkością  $v$ ). Środek układu stanowi punkt, w którym znajduje się środek masy zestawu. W układzie zostały zdefiniowane kąty obrotu względem osi układu tak jak zostało to przedstawione na rysunku 1.

Generacji równań ruchu dokonano przy wykorzystaniu programu Working Model 2D ver. 4.0.1. Rysunek 2 przedstawia implementację modelu nominalnego.



Rys. 2 Widok wagonu (przód) w implementacji w Working Model 2D

### 3. Wyniki badań symulacyjnych

Poniżej podano przykładowe wyniki symulacji. Współczynnik uszkodzenia elementu definiowany jest jako:

$$usz = \frac{Y_{usz}}{Y_{pr}} \quad (1)$$

lub

$$usz\% = \frac{Y_{usz}}{Y_{pr}} * 100\% \quad (2)$$

gdzie:

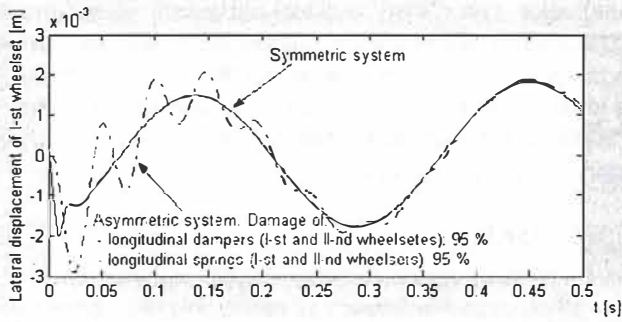
$Y_{pr}$  - wartość prawidłowa /np. stałej sprężyny/

$Y_{usz}$  - wartość elementu uszkodzonego

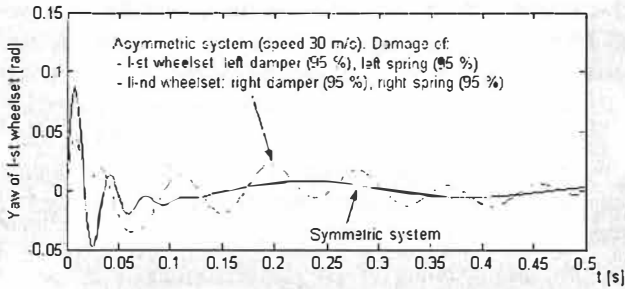
W przeprowadzonych dotychczas symulacjach skoncentrowano się przede wszystkim na zaburzeniu elementów podatnych zawieszenia. Praktycznie na wszystkich zamieszczonych przykładach można zaobserwować znaczące różnice w dynamice między układem symetrycznym i asymetrycznym. Układ z zaburzeniem symetrii wykazuje większy poziom drgań, w niektórych przypadkach zdecydowanie wolniej zbiega do stanu równowagi kinetostatycznej. W poszczególnych sytuacjach można też zaobserwować występowanie nowych efektów dynamicznych. Na rysunkach 3÷6 zaprezentowana wyniki dotyczące ruchu po torze prostym. Na rysunkach 7÷9 ruchu po odcinkach: tor prosty, krzywa przejściowa, łuk kołowy, krzywa przejściowa i tor prosty.

Zestawienie przykładowych wyników (niszczeniu ulegały elementy w pierwszym zestawie kołowym pierwszego wózka) Tabela 2

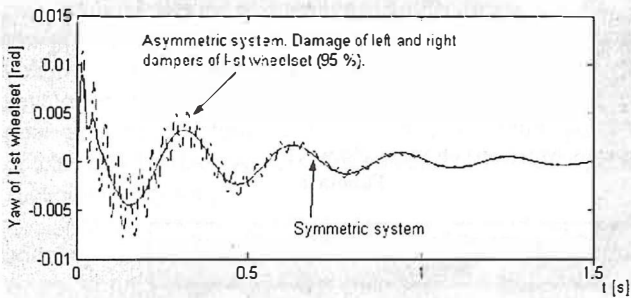
Element uszkodzony /symbol, definicja/	Wartość prawidłowa	Wartość elementu uszkodzonego	Współczynnik uszkodzenia
Lewa wzdłużna sprężyna	105000 [N/m]	63000 [N/m]	60 %
Lewa poprzeczna sprężyna	105000 [N/m]	63000 [N/m]	60 %
Lewy poprzeczny tłumik	$4,45e+7$ [N/m]	$4,4e+7$ [N/m]	0 %
Lewy poprzeczny tłumik	$4,45e+7$ [N/m]	$1,1e+7$ [N/m]	25 %
Lewa poprzeczna sprężyna	105000 [N/m]	5000 [N/m]	0 %
Lewy wzdłużny tłumik	$4,45e+7$ [N/m]	$1,1e+7$ [N/m]	25 %
Lewa wzdłużna sprężyna	105000 [N/m]	63000 [N/m]	60 %



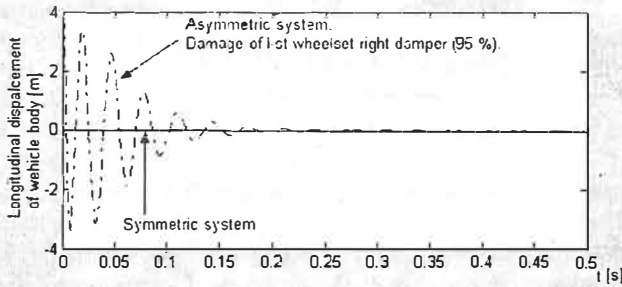
Rys.3. Wyniki badań symulacyjnych – ruch po torze prostym



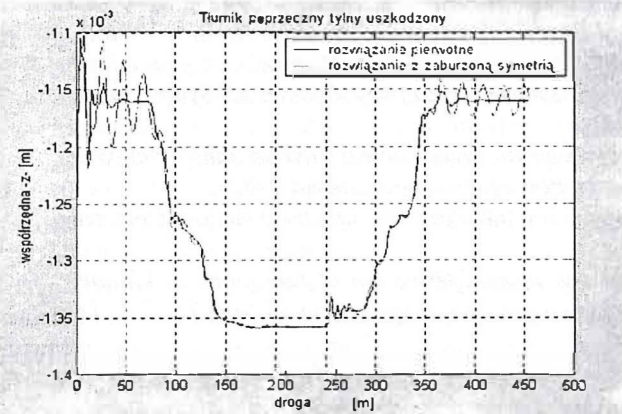
Rys.4 Wyniki badań symulacyjnych – ruch po torze prostym



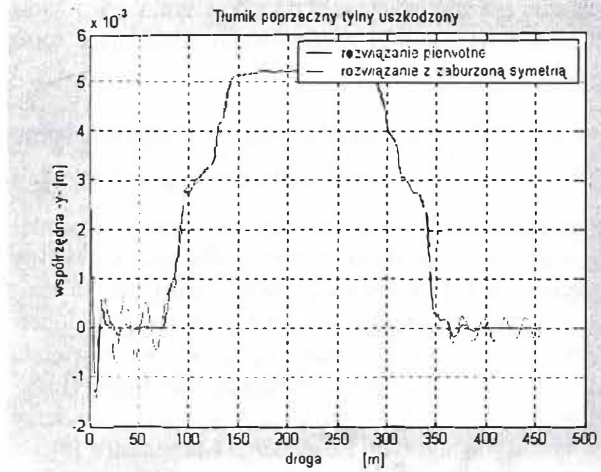
Rys.5 Wyniki badań symulacyjnych – ruch po torze prostym



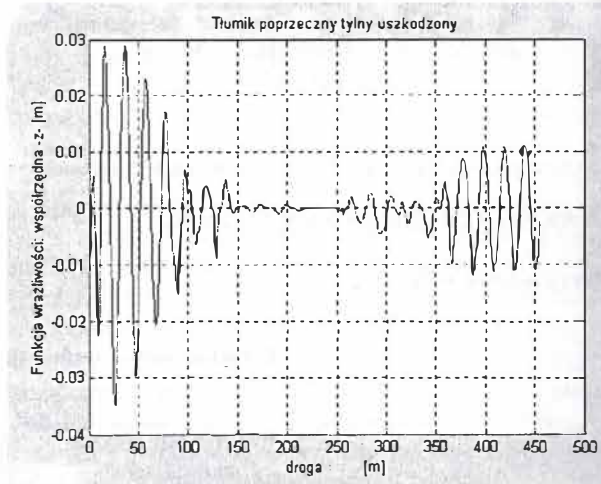
Rys.6 Wyniki badań symulacyjnych – ruch po torze prostym



Rys.7 Ruch po odcinku: tor prosty – krzywa przejściowa-luk kołowy-krzywa przejściowa-tor prosty



Rys.8 Ruch po odcinku: tor prosty – krzywa przejściowa-luk kołowy-krzywa przejściowa-tor prosty



Rys.9 Ruch po odcinku: tor prosty – krzywa przejściowa-luk kołowy-krzywa przejściowa-tor prosty

#### 4. Koncepcja diagnostyki w oparciu o dynamiczne efekty powodowane zaburzeniem symetrii

Uszkodzenia poszczególnych elementów konstrukcji prowadzących do asymetrii powodują wyraźne efekty dynamiczne. Zagadnieniem istotnym z punktu widzenia diagnostyki pojazdu jest rozwiązanie problemu odwrotnego tzn. wskazanie elementów, które uległy uszkodzeniu oraz oszacowania stopnia ich uszkodzenia.

##### 4.1 Opis metody

Elementami wejściowymi do sieci neuronowej są składowe wektora zdefiniowanego następująco:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_u & \dot{q}_u & q_u & \ddot{q}_u^2 & \dot{q}_u^2 & q_u^2 \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

gdzie:

$$\bar{q}_u = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt, \quad \bar{q}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt \quad (4)$$

$q$  - wektor współrzędnych uogólnionych,

$T$  - czas symulacji.

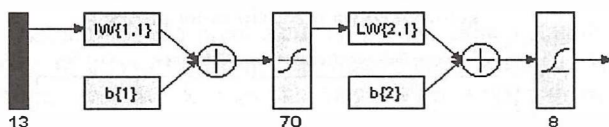
W przykładzie numerycznym wykorzystano fragment wektora zdefiniowanego równaniem (5), a mianowicie wektor:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1 & \ddot{\psi}_1 & \dot{y}_1 & \dot{\psi}_1 & y_1 & \psi_1 & \dot{y}_1^2 & \dot{\psi}_1^2 & \dot{y}_1 \dot{\psi}_1 & y_1 \psi_1 & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dla potrzeb prezentowanych przykładów symulacji wektor wyjść z sieci neuronowej zdefiniowano następująco (opis oznaczeń - patrz tab. 1):

$$[c_{x11}, c_{x12}, c_{x13}, c_{x14}, k_{x11}, k_{x12}, k_{x13}, k_{x14}, c_{y11}, c_{y13}, k_{y11}, k_{y13}, c_{z21}, c_{z22}, c_{z23}, c_{z24}, k_{z21}, k_{z22}, k_{z23}, k_{z24}, v] \quad (6)$$

Sieć neuronowa została zaprogramowana w środowisku Matlab-ver.6 jako dwuwarstwowa sieć nieliniowa typu backpropagation [9]. Warstwa pierwsza zawierała 70 neuronów o funkcji transferującej typu tagsim (tangens hiperboliczny) - patrz rys 10. Warstwa wyjściowa zawierała osiem neuronów o funkcji transferującej typu logsig (funkcja logistyczna). Do treningu sieci i określenia macierzy wag zastosowano algorytm Levenberga-Marquardt'a [9].



Rys. 10 Struktura wykorzystanej do diagnostyki sieci neuronowej

Procedura miała bardzo dobrą zbieżność.

#### 4.2 Przykładowe wyniki

Przykłady wykorzystanych wektorów wejściowych i wyjściowych  
Tabela 3

Nr	Rzeczywisty wektor uszkodzeń	Wynik diagnostyki z wykorzystaniem sieci neuronowej
1.	[... 1 1 1 1 1 1 0,6 1 ...] <sup>T</sup>	[... 0,95 0,99 1 0,94 1 0,99 0,65 1 ...] <sup>T</sup>
2.	[... 1 1 1 1 0,25 1 0 1 ...] <sup>T</sup>	[... 1 0,94 1 1 0,23 1 0,01 1 ...] <sup>T</sup>
3.	[... 0,25 1 1 1 0,6 1 1 1 ...] <sup>T</sup>	[... 0,25 1 0,94 1 0,6 1 0,93 0,99 ...] <sup>T</sup>

- [1] W. Choromański, J. Madej, K. Zboński, *Investigations into Dynamics of Railway Vehicles with Symmetry Disturbances*, Archives of Transport (w druku), 2002.
- [2] W. Choromański, *Symulacja i optymalizacja w dynamice pojazdów szynowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (rozprawa habilitacyjna), Warszawa 1999.
- [3] J. Jabłońska, W. Choromański, *Selected topics of modelling, simulation and diagnostic of non-symmetric railway vehicle – track system model*, Archives of Transport, vol. 14, Warsaw 2002.
- [4] J. Jabłońska, W. Choromański, *Modelling, Simulation And Diagnostic On Non-Symmetric Railway Vehicle*, 8<sup>th</sup> Mini Conference On Vehicle System Dynamics, Identification And Anomalies, Budapest, Hungary 2002
- [5] J. Jabłońska, W. Choromański, *Dynamics and Simulation of Asymmetric Railway Vehicle*, XX Symposium – Vibration In Physical Systems, Poznań – Błażejewko 2002
- [6] J. Madej, *Wpływ asymetrii parametrycznej pojazdu szynowego na przepustowość dynamiczną wymuszeń torowych (studium metodyki badań)*, praca niepublikowana, Politechnika Warszawska 2002
- [7] J.J.Kalker, *On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction* Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, 1967
- [8] T. Pearce, T.G. Pearce, *The Theory of Railway Vehicle Dynamics. Derivation of Equations of Motion*, British Railway Board Research and Development Division Dynamics Group, Technical Note TN D.A. 31, 1985
- [9] R. Tadeusiewicz, *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1993