

EWA KARDAS-CINAL*

BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU LOKALNEGO STANU TORU NA BEZPIECZEŃSTWO JAZDY POJAZDU SZYNOWEGO – ANALIZA STATYSTYCZNA

SIMULATION STUDY OF LOCAL TRACK CONDITION EFFECT ON RUNNING SAFETY OF RAILWAY VEHICLE – STATISTICAL ANALYSIS

Streszczenie

W artykule przeprowadzono statystyczną analizę nierówności geometrycznych toru w pobliżu punktów toru, w których występują duże wartości współczynnika wykolejenia Y/Q otrzymane w symulacjach ruchu pojazdu szynowego po torze prostym. Stwierdzono silny wpływ lokalnych oscyłacji poprzecznych nierówności toru i przechyłki o długości fali bliskiej długości fali wężykowania zestawu kołowego na powstawanie lokalnych ekstremów Y/Q .

Słowa kluczowe: pojazd szynowy, bezpieczeństwo jazdy, lokalny stan toru

Abstract

In the paper a statistical analysis is applied to track geometrical irregularities in the vicinity of track points where large values of derailment coefficient Y/Q occur. On the basis of simulation results for railway vehicle moving along a tangent track, it is found that local oscillations of lateral track irregularities and superelevation with wavelengths close the wavelength of wheelset hunting have a strong effect on occurrence of local extrema of Y/Q .

Keywords: railway vehicle, riding safety, local track condition

* Dr inż. Ewa Kardas-Cinal, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska.

Oznaczenia

- f – częstotliwość spacjalna [m^{-1}]
 h_w – przechyłka toru [m]
 l_0 – połowa szerokości toru [m]
 λ – długość fali wężykowania [m]
 Q – siła pionowa w punkcie kontaktu koła z szyną [N]
 v – prędkość jazdy [m/s]
 x – współrzędna mierzona wzdłuż osi toru [m]
 Y – siła poprzeczna w punkcie kontaktu koła z szyną [N]
 y_1 – przemieszczenie poprzeczne zestawu kołowego [m]
 y_w – nierówność poprzeczna linii środkowej toru [m]
 z_w – nierówność pionowa linii środkowej toru [m]

1. Wstęp

Bezpieczeństwo jazdy jest jednym z podstawowych zagadnień, które są analizowane w badaniach dynamiki pojazdu szynowego [2, 4, 12, 14]. Zagadnienie to było również tematem prac autorki [6–9], które uwzględniały losowy charakter nierówności geometrycznych toru. Ocena bezpieczeństwa przeciw wykołajeniu jest przeprowadzana za pomocą kryterium Nadala na podstawie stosunku siły poprzecznej Y do pionowej Q w punkcie kontaktu koła z szyną [10]. W normach UIC 518 [13] oraz EN [1] stosowane jest zmodyfikowane kryterium Nadala określające maksymalną wartość współczynnika bezpieczeństwa przeciw wykołajeniu Y/Q , po jego uśrednieniu (w każdym punkcie toru) na odcinku o długości 2 m. Niebezpieczeństwo wykołajenia może być wynikiem silnego wężykowania zestawów kołowych, które prowadzi do pojawienia się dużych wartości Y/Q . Wężykowanie zestawów kołowych jest rodzajem niestabilności układu, pojawiającym się przy wysokich prędkościach ruchu [12] i polega na oscylacyjnych zmianach poprzecznego przemieszczenia zestawu względem linii środkowej toru sprzężonych z jego oscylacyjnym obrotem w płaszczyźnie równoległej do toru. Zjawisko to związane jest ze stożkowatością kół, przy czym długość fali wężykowania λ , określona w najprostszym ujęciu za pomocą wzorów Klingera, jest niezależna od prędkości ruchu pojazdu szynowego v [12]. Ruch zestawu kołowego podczas wężykowania w torze był szczegółowo analizowany przez W. Gąsowskiego i R. Langa w pracach [3].

W pracach [7, 9] stwierdzono, iż gęstość widmowa mocy wykazuje charakterystyczne maksima, przy czym jedynie częstotliwość spacjalna f_1 pierwszego z nich leży w przedziale częstotliwości spacjalnych, w którym gęstości widmowe mocy nierówności geometrycznych toru osiągają największe wartości. Natomiast pozostałe dwa maksima f_2, f_3 są w jednoznaczny sposób powiązane z częstotliwością spacjalną wężykowania zestawu kołowego. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych [8] wynika, że częstotliwość spacjalna f_2 jest równa częstotliwości wężykowania zestawu. Natomiast występowanie maksimum gęstości widmowej Y/Q dla częstotliwości spacjalnej $f_3 \approx 2f_2$ jest głównie związane z silnie nieliniową zależnością kąta γ nachylenia boku obrzeża koła (w punkcie kontaktu koło/szyna) od przemieszczenia poprzecznego zestawu. W pracy [6] pokazano, że składowe oscylacyjne poprzecznych nierówności geometrycznych toru o częstotliwościach spacjalnych bliskich częstotliwości spacjalnej wężykowania – pomimo ich relatywnie małej amplitudy – są odpowiedzialne za powstawanie

oscylacji Y/Q o częstotliwościach f_2 i f_3 , ujawniających się jako maksima gęstości widmowej Y/Q . Analizowano również wpływ lokalnych nierówności geometrycznych toru na wężykowanie zestawów kołowych i jego amplitudę, a w rezultacie na amplitudę wartości Y/Q , określającą bezpieczeństwo jazdy. Niniejszy artykuł stanowi kontynuację tych badań wykorzystujących statystyczną analizę zależności Y/Q od lokalnego stanu toru.

2. Badania symulacyjne bezpieczeństwa jazdy

2.1. Model pojazdu szynowego

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone z użyciem nieliniowego modelu pojazdu szynowego o 27 stopniach swobody, który był stosowany również w pracach [6–9]. Model opisuje wagon pasażerski złożony z siedmiu brył: nadwozia pojazdu, dwóch wózków i czterech zestawów kołowych, pomiędzy którymi występują połączenia sprężysto-tłumiące, o liniowych charakterystykach, tworzące zawieszenie I i II. Zależność sił w kontakcie koło/szyna od mikropoślizgów [11] jest wyznaczana za pomocą uproszczonej nieliniowej teorii kontaktu Kalkera [5]. Badania przeprowadzono dla układu pojazd szynowy–tor z szynami typu UIC60 i kołami o profilach S1002 i podobnie jak w pracy [6–9] ruch pojazdu symulowano dla stałej prędkości v po prostym, sztywnym torze, wykazującym losowe nierówności geometryczne: zmienną szerokość $2l_0(x)$, przechyłkę $h_w(x)$ oraz poprzeczne $y_w(x)$ i pionowe $z_w(x)$ nierówności linii środkowej. W niniejszym artykule nierówności toru są traktowane jako realizacje stacjonarnych, ergodycznych procesów stochastycznych i oznaczane przez wektor $\xi_w = (y_w, z_w, h_w, 2l_0)$.

2.2. Kryterium bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu

W artykule badany jest iloraz siły poprzecznej Y do pionowej Q w punkcie kontaktu koło–szyna, który jest stosowany do oceny bezpieczeństwa jazdy według kryterium Nadala [10]. Zgodnie z normami UIC 518 [13] i EN 14363 [1] wykolejenie pojazdu szynowego może wystąpić, gdy iloraz Y/Q przekroczy graniczną wartość 0,8 na drodze $\Delta x = 2$ m. W związku z tym do porównania z wartością graniczną używa się w wymienionych normach średniej ruchomej Y/Q z oknem $\Delta x = 2$ m, oznaczanej przez $(Y/Q)_{2m}$.

2.3. Wyniki – analiza statystyczna nierówności geometrycznych toru

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych było znalezienie odpowiedzi na pytanie: jaki jest związek pomiędzy nierównościami geometrycznymi toru a występowaniem lokalnych ekstremów (pików) ilorazu Y/Q o dużych wartościach i jaką rolę w tej zależności odgrywa wężykowanie zestawów kołowych?

Wyznaczanie widmowych gęstości mocy, jak to stosowano w pracach [6–9], umożliwia analizę zależności pomiędzy składowymi oscylacyjnymi nierównościami toru o różnych częstotliwościach specjalnych a składowymi oscylacyjnymi odpowiedziami dynamicznymi układu, w szczególności ilorazu sił kontaktowych Y/Q . Podejście takie nie pozwala jednak na zbadanie związku pomiędzy lokalną zmiennością nierówności toru a lokalnymi zmianami Y/Q . Związek taki może być skutecznie badany za pomocą statystycznej analizy lokalnego

stanu toru w pobliżu punktów toru $x = x_{peak}^{(k)}$, w których występują piki $Y(x)/Q(x)$ o dużych wartościach. W metodzie zapronowanej w pracy [6] wyznacza się – dla danej odległości u od punktu położenia piku – wartość nierówności toru ξ_w^{av} (dla każdej ze składowych) uśrednioną po zbiorze wszystkich M odcinków toru w pobliżu punktów, w których wystąpiły piki Y/Q :

$$\xi_w^{av}(u) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \xi_w(x_{peak}^{(k)} + u) \quad (1)$$

W ten sposób można określić, które składowe oscylacyjne nierówności geometrycznych toru $\xi_w = (y_w, z_w, h_w, 2l_0)$ dominują w zależnościach $\xi_w(x) = \xi_w(x_{peak}^{(k)} + u)$ w pobliżu punktów, w których występują piki $Y(x)/Q(x)$.

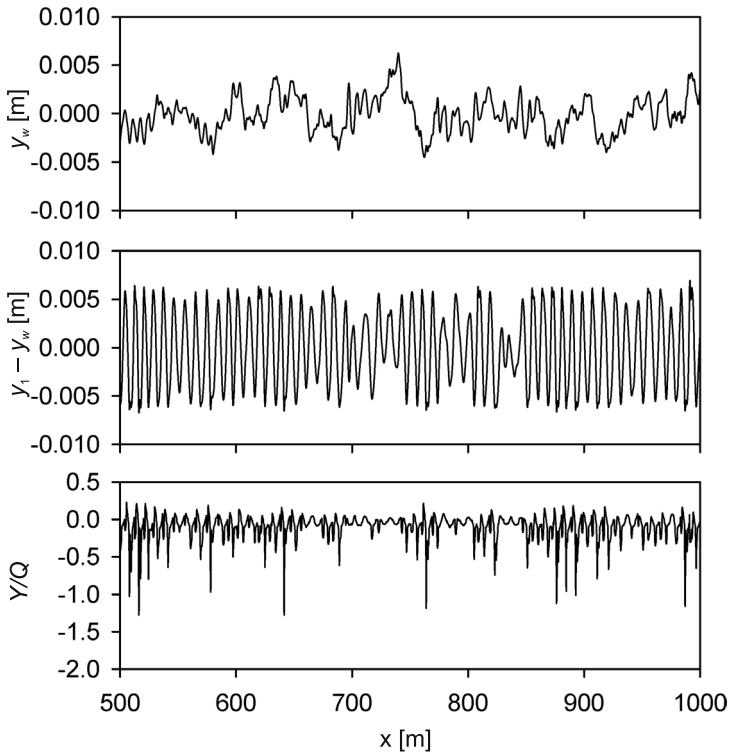
Symulacje ruchu pojazdu przeprowadzono na odcinku toru prostego i sztywnego o długości 4000 m, który wykazuje losowe nierówności geometryczne. Symulacje przeprowadzono celowo dla wysokiej prędkości jazdy, ponieważ występują wtedy duże wartości Y/Q w wielu punktach toru, co umożliwia statystyczną analizę wielkości opisujących lokalny stan toru i ruch pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono poprzeczne nierówności geometryczne toru y_w na wybranym fragmencie badanego odcinka toru oraz otrzymane przemieszczenia poprzeczne prowadzącego zestawu kołowego względem toru ($y_1 - y_w$), oraz iloraz Y/Q . Lokalne maksima Y/Q o dużych wartościach (np. większych niż 1,0) występują w punktach toru, w których przemieszczenie poprzeczne zestawu podczas wężykowania osiąga wartość bliską maksymalnej. W tych punktach bowiem kąt nachylenia γ obrzeża koła względem szyny (zależny nieliniowo od $(y_1 - y_w)$) osiąga dużą wartość, co prowadzi do silnego wzrostu wartości Y/Q [8]. Natomiast znacznie trudniejsze jest znalezienie bezpośredniego związku pomiędzy nierównościami geometrycznymi toru (np. y_w) stanowiącymi zaburzenie ruchu pojazdu szynowego a ilorazem sił kontaktowych Y/Q stanowiącym odpowiedź dynamiczną układu na to zaburzenie. W szczególności związek taki niełatwo dostrzec, porównując przebiegi y_w i Y/Q przedstawione na rys. 1.

W celu znalezienia takiego związku zastosowano opisaną wyżej metodę statystyczną analizy nierówności geometrycznych toru w pobliżu tych punktów toru $x = x_{peak}^{(k)}$, w których występują piki $Y(x)/Q(x)$ o dużych wartościach. Za pomocą wzoru (1) wyznaczono uśrednione statystycznie wartości poszczególnych nierówności geometrycznych toru: y_w^{av} , z_w^{av} , h_w^{av} , l_0^{av} w pobliżu położenia pików Y/Q o wartości przekraczającej 1,3. Należy tu zwrócić uwagę, że wartości Y/Q są otrzymane bezpośrednio z symulacji i nie należy ich bezpośrednio porównywać z wartością graniczną 0,8, która jest określona w normach [1, 13]; wartość graniczna odnosi się do średniej ruchomej Y/Q z oknem 2 m i nie jest przez nią przekroczona również w przypadku analizowanych wyników symulacji [8].

Wartości y_w^{av} , h_w^{av} jako funkcje odległości $u = x - x_{peak}$ od miejsca wystąpienia piku Y/Q (dla lewego i prawego koła zestawu prowadzącego przedniego wózka) są przedstawione na rys. 2. Zarówno dla nierówności poprzecznych, jak i przechyłki toru występuje – na odcinku toru o długości około 30 m przed punktem wystąpienia piku Y/Q – charakterystyczna lokalna oscylacja y_w^{av} , h_w^{av} o długości fali bliskiej długości fali wężykowania zestawów kołowych ($\lambda \approx 1/f_2 \approx 9$ m). To oznacza, że dla poszczególnych pików Y/Q bezpośrednią przyczyną ich

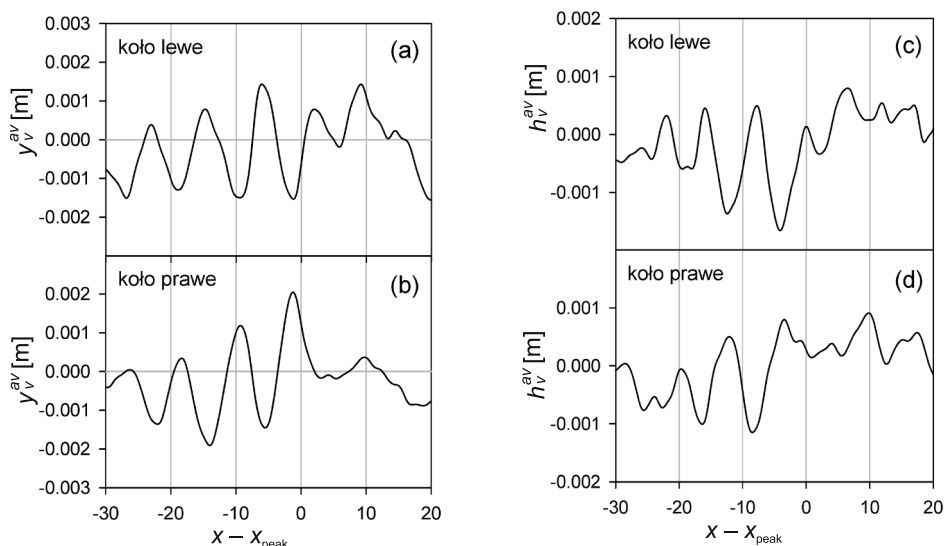
pojawienia się jest występowanie lokalnej oscylacji $y_w(x)$ lub lokalnej oscylacji $h_w(x)$ (lub obu oscylacji jednocześnie) o długości fali bliskiej długości fali wężykowania zestawów kołowych ($1/f_2 \approx 9$ m). Dla wystąpienia piku Y/Q ważne jest również, aby takie lokalne oscylacje nierówności toru były odpowiednio przesunięte w fazie względem oscylacji wężykowania zestawów kołowych w danym punkcie toru. Taki mechanizm powstawania lokalnych maksimów Y/Q , związany ze zjawiskiem rezonansu pomiędzy y_w a poprzecznym przemieszczeniem zestawu kołowego względem toru $y_1 - y_w$, jest wyraźnie widoczny na rys. 3.

Należy też zauważyć (rys. 2), że (około 2 m) przed punktem wystąpienia piku Y/Q dla lewego koła oscylacje y_w^{av} mają lokalne minimum, natomiast przed punktem wystąpienia piku Y/Q dla prawego koła oscylacje y_w^{av} mają lokalne maksimum. Takie zachowanie y_w powoduje bowiem wystąpienie minimum $y_1 - y_w$ (czyli maksymalne poprzeczne przesunięcie zestawu w lewą stronę) dokładnie w punkcie piku Y/Q dla lewego koła (rys. 3), zaś maksimum $y_1 - y_w$ (maksymalne przesunięcie w lewą stronę) – dla koła prawego.



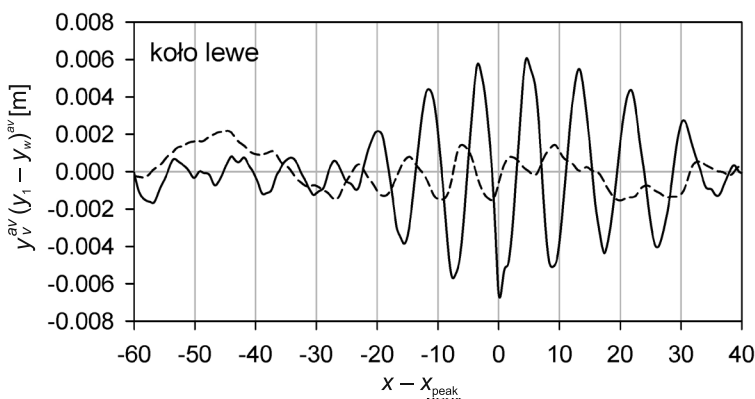
Rys. 1. Nierówności poprzeczne toru y_w , przemieszczenia poprzeczne prowadzącego zestawu kołowego względem linii środkowej toru $y_1 - y_w$ oraz iloraz siły poprzecznej Y do pionowej Q w punkcie kontaktu koło–szyna (lewe koło) dla odcinka toru $500 \text{ m} \leq x \leq 1000 \text{ m}$; $v = 200 \text{ km/h}$; $v = 200 \text{ km/h}$

Fig. 1. Lateral track irregularities y_w , lateral displacement of leading wheelset in front bogie with respect to track centre line $y_1 - y_w$, and the ratio of lateral Y to vertical Q force in the wheel-rail contact point (left wheel) for the track section $500 \text{ m} \leq x \leq 1000 \text{ m}$; $v = 200 \text{ km/h}$; $v = 200 \text{ km/h}$



Rys. 2. Nierówności poprzeczne toru y_w^{av} (a, b) i lokalna przechyłka toru h_w^{av} (c, d) uśrednione po zbiorze odcinków toru w pobliżu punktów, w których występują lokalne maksima $|Y/Q| \geq 1,3$, dla lewego (lub prawego) koła zestawu prowadzącego wózek przedniego, $v = 200$ km/h

Fig. 2. Lateral track irregularities y_w^{av} (a, b) and local superlevation h_w^{av} (c, d) averaged over the set of track intervals in the vicinity of track points where local maxima $|Y/Q| \geq 1,3$, occur, for left (or right) wheel of leading wheelset in front bogie, $v = 200$ km/h



Rys. 3. Przeszczenie poprzeczne prowadzącego zestawu kołowego względem toru $(y_1 - y_2)^{av}$ (linia ciągła) oraz nierówności poprzeczne toru y_w^{av} (linia przerywana) uśrednione po zbiorze różnych odcinków toru w pobliżu punktów $x = x_{peak}^{(k)}$ ($k = 1, \dots, M = 10$), w których występują lokalne maksima $|Y/Q| \geq 1,3$ dla lewego koła zestawu. Wózek przedni, $v = 200$ km/h

Fig. 3. Lateral displacement of leading wheelset (front bogie) with respect to track centre line $(y_1 - y_2)^{av}$ (solid line) and lateral track irregularities y_w^{av} (dashed line) averaged over the set of track intervals in the vicinity of track points $x = x_{peak}^{(k)}$ ($k = 1, \dots, M = 10$), where local maxima $|Y/Q| \geq 1,3$ occur, $v = 200$ km/h

3. Wnioski

Na podstawie wyników symulacji stwierdzono, że bezpośrednią przyczyną pojawiania się silnych lokalnych maksimum współczynnika bezpieczeństwa przeciw wykołaceniu $|Y/Q|$ jest występowanie lokalnych oscylacji nierówności poprzecznych toru $y_w(x)$ i (lub) jego przechyłki $h_w(x)$ o długości fali równej długości fali wężykowania zestawu kołowego. Wyznaczono typową postać oscylacji nierówności toru przed punktami toru, w których Y/Q osiąga dużą wartość dla lewego (prawego) koła. Pokazano, że lokalne oscylacje nierówności toru wymuszają lokalny wzrost amplitudy wężykowania zestawu kołowego, a tym samym silny wzrost Y/Q poprzez zjawisko rezonansu mechanicznego.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (projekt badawczy nr No N N509 4040360).

Literatura

- [1] EN 14363, Railway applications – Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Testing of running behaviour and stationary tests, European Committee For Standardization, 2005.
- [2] Evans J., Berg M., *Challenges in simulation of rail vehicle dynamics*, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 47, Issue 8, 2009, 1023-1048.
- [3] Gąsowski W., Lang R., *Kołysanie poprzeczne zestawu kołowego podczas wężykowania w torze* (1–7), Pojazdy Szynowe, nr 2, 35-44, 1999 (1), nr 3, 26-49, 1999 (2), nr 4, 1-18, 1999 (3), nr 1, 1-26, 2000 (4), nr 2, 1-8, 2000 (5), nr 4, 1-7, 2000 (6), 2001, nr 2, 1-9, 2000 (7).
- [4] Iwnicki S.(ed.), *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press Inc., 2006.
- [5] Kalker J.J., *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*, Vehicle System Dynamics, Vol. 11, 1-3, 1982.
- [6] Kardas-Cinal E., *Analiza statystyczna wpływu lokalnego stanu toru na bezpieczeństwo jazdy pojazdu szynowego*, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka”, Waplewo 6–9 września 2011 (w druku).
- [7] Kardas-Cinal E., *Comparative study of running safety and ride comfort of railway vehicle*, Prace Naukowe Transport, z. 71, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009, 75-84.
- [8] Kardas-Cinal E., *Spectral analysis of derailment coefficient in railway vehicle – track system with random track irregularities*, Proceedings of 21st International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, IAVSD'09, 17-21 August 2009, KTH, Stockholm, (wersja elektroniczna); abstrakt pracy – Abstract Book IAVSD'09, 360-361.
- [9] Kardas-Cinal E., Drożdziel J., Sowiński B., *Simulation testing of a relation between the derailment coefficient and the track condition*, Archives of Transport, Vol. 21, Issue 1–2, 2009, 85-98.
- [10] Nadal M.J., *Theorie de la Stabilité des Locomotives, Part 2, Movement de Lacet*, Annales des Mines, Vol. 10, 1896, 232.

- [11] Piotrowski J., *Poprzeczne oddziaływanie między pojazdem szynowym a torem*, Prace Naukowe Mechanika, z. 118, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [12] Shabana A.A., Zaaza K.E., Sugiyama H., *Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach*, Taylor & Francis/CRC, 2008.
- [13] UIC Code 518 OR, *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue-Ride quality*, International Union of Railways, 2nd edition, April 2003.
- [14] Wu H., Shu X., Wilson N., TCRP Report 71, Track-Related Research, Volume 5, *Flange Climb Derailment Criteria and Wheel/Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations*, Transportation Research Board of the National Academies (USA), 2005.