

MODELOWANIE I SYMULACJA ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH KOŁO – SZYNA W RUCHU POJAZDU W ROZJEŹDZIE KOLEJOWYM

Sławomir Duda^{1a}

¹Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: sduda@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodykę modelowania ruchu pojazdu szynowego po dowolnym torze, w tym podczas ruchu przez szczególny rodzaj toru, jakim jest rozjazd kolejowy. Ruch pojazdu jest następstwem przenoszenia przez układ napędowy na koła pojazdu momentu napędowego, natomiast odpowiednie prowadzenie pojazdu jest skutkiem sił kontaktowych na powierzchni koła z szyną. Opracowano adekwatne modele: pojazdu wraz z układem napędowym oraz kontaktu koło – szyna. Modele te zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink. Model kontaktu koło – szyna ma charakter ogólny, pozwalający na wyznaczenie w trakcie prowadzonej analizy współrzędnych punktów kontaktu pomiędzy kołem a szyną. Proponowany model nie tylko umożliwia identyfikowanie wielopunktowego kontaktu, lecz także pozwala na wydajne i dokładne obliczenie sił wzajemnego oddziaływania pomiędzy kołem a szyną.

MODELLING AND NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC PHENOMENA OF RAILWAY VEHICLES IN MOTION RAIL JUNCTION

Summary

This paper presents a methodology for modelling the movements rail vehicle on any track, including movements over a specific type of track - a rail junction. Vehicle movement is the result of the drive system of a vehicle transferring torque onto the wheels of the vehicle, while the appropriate driving force is a result of forces resulting from contact between the wheel surface and the rail. The following applicable models were prepared: of the vehicle with the drive system and of the contact wheel - rail. These models were implemented in Matlab/Simulink. The wheel - rail contact model is general in nature, allowing the setting of coordinates of the points of contact between the wheel and rail during the analysis performed. The proposed model not only allows identification of a multi-point contact, but also allows for efficient and accurate calculation of the forces of interaction between the wheel and the rail.

1. WSTĘP

Podczas korzystania ze współczesnych urządzeń, maszyn czy pojazdów zwraca się uwagę zarówno na trwałość jak i na estetykę. Rozwój cywilizacyjny ugruntował w użytkownikach przekonanie, że wytworzenie wyrobu o niezadowalających parametrach jest niedopuszczalne. Szczególnego znaczenia nabiera ten fakt dla tych producentów, u których koszt wprowadzenia na rynek nowego

produktu liczony jest w milionach euro (przemysł lotniczy, transportowy). W tym przypadku wszelkiego rodzaju informacje na temat wad produktu będącego już w sprzedaży mogą doprowadzić firmę do bankructwa czy nadszarpnięcia jej wizerunku. Zanim więc firma wprowadzi na rynek nowy produkt wykonuje wiele testów i badań. Choć badania prowadzone na egzempla-

rzach prototypowych wydają się być wiarygodniejsze od badań prowadzonych na modelach numerycznych, głównie ze względów ekonomicznych, to zwłaszcza w pierwszej fazie „zmagania koncepcyjnych” są coraz częściej stosowane. Metoda prób i błędów w procesie projektowania nowych prototypów maszyn i urządzeń należy już do przeszłości. W dzisiejszym świecie komputer stał się użytecznym narzędziem w projektowaniu, pozwalając na wszechstronną analizę wyrobu na każdym etapie jego wytwarzania oraz na przedstawienie wyników symulacji różnych sytuacji, jakie mogą zaistnieć podczas eksploatacji maszyny.

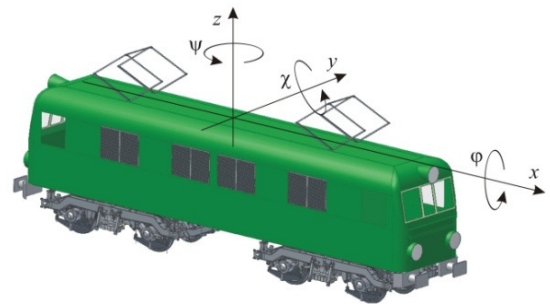
Badania modelowe stosowane są zarówno podczas poszukiwania nowych rozwiązań w transporcie jak i w dotychczas istniejących pojazdach. Wymagania co do zwiększenia prędkości jazdy, tonażu przewożonego ładunku oraz poprawy warunków przewozu dotyczą pojazdów już istniejących. Wymuszają one konieczność rozwiązania na nowo zagadnienia kontroli współpracy koło – szyna i utrzymania stabilności pojazdu w różnych warunkach pracy. Nie wystarczają już uproszczone modele toru. Złożoność zjawisk towarzyszących kontaktowi koło – szyna wywołuje potrzebę budowania skomplikowanych modeli toru, gdyż siły generowane na styku tych elementów silnie wpływają na zachowanie dynamiczne całego pojazdu szynowego. Szczególnego znaczenia nabiera ten fakt w przypadku przejazdu pojazdu szynowego przez specyficzny odcinek toru jaki jest rozjazd kolejowy.

W ostatnim czasie metody numeryczne analizy dynamiki układów mechanicznych stały się znacznie bardziej efektywne i niezawodne, co umożliwiło dokonywanie opisu układów o zwiększonej złożoności. Układy mechaniczne wymagają opisu ruchu elementów, nierzadko realizujących duże przemieszczenia, z uwzględnieniem złożonego współdziałania z otaczającym środowiskiem. Zastosowanie formalizmu dla układów wielocłonowych rozumianych jako układy wielu ciał połączonych poprzez różne typy par kinematycznych i działających nań sił wewnętrznych lub zewnętrznych umożliwia badanie zjawisk dynamicznych w nich występujących.

2. MODEL POJAZDU SZYNOWEGO

W celu przeprowadzenia badań oddziaływań dynamicznych, jakie powstają na styku pojazdu z torem, opraco-

wano model pojazdu w konwencji układów wielocłonowych, wykorzystując oprogramowanie Matlab/Simulink. Przeprowadzając analizę postaci konstrukcyjnej lokomotywy, dokonując niezbędnych uproszczeń, opracowano model fizyczny pojazdu [6], a następnie uzyskano jego interpretację w programie SimMechanics. Niezbędne parametry opisujące model jak, masy, momenty bezwładności, wymiary opisujące położenie par kinematycznych uzyskano z modelu 3D, utworzonego w programie Autodesk Inventor (rys. 1). Pozostałe parametry, sztywności i tłumienia elementów zawieszenia pierwszego i drugiego stopnia odsprężynowania, uzyskano z dokumentacji dostarczonej przez Zakłady Naprawcze Lokomotyw Elektrycznych w Gliwicach.



Rys. 1. Model pojazdu wykonany w programie Inventor

3. SIŁY KONTAKTOWE KOŁO - SZYNA

W dynamice pojazdu szynowego interakcje pomiędzy kołem a szyną odgrywają zasadniczą rolę w ruchu pojazdu, ponieważ to od nich pochodzą siły stanowiące podparcie i odpowiednie prowadzenie. Badanie kontaktu pomiędzy kołem a szyną sprowadza się do rozpatrzenia trzech, odrębnych, ale powiązanych problemów, tj. geometrii kontaktu, kinematyki kontaktu i mechanizmu kontaktu.

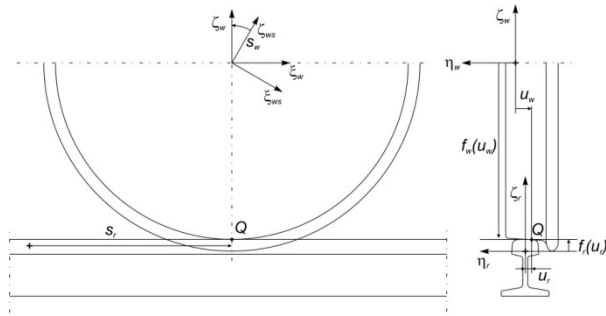
Badanie kontaktu koło – szyna jest złożonym zadaniem. W literaturze można spotkać kilka metod rozwiązania tego problemu [1, 2]. Powstały algorytmy i programy komputerowe służące do wyznaczenia sił stycznych w punkcie kontaktu na podstawie znajomości siły normalnej i względnych prędkości pomiędzy ciałami.

Program komputerowy zastosowany do analizy dynamiki ruchu pojazdu szynowego po torze realizuje następujący algorytm przedstawiony poniżej. Ze względu na szeroki zakres informacji związanych z poszczególnymi podpunktami, szerzej mówiono jedynie punkt związany

z modelowaniem toru w rozjeździe. Szczegółowe zależności wykorzystywane do obliczeń realizowanych w punktach a – g prezentowanego algorytmu można znaleźć w pracach [1-4].

- a) *Przyjęcie warunków początkowych dla współrzędnych położenia $\mathbf{q}(t^0)$ i prędkości $\dot{\mathbf{q}}(t^0)$ oraz określenie początkowych wartości parametrów powierzchni $s_r(t^0)$, $u_r(t^0)$, $s_w(t^0)$ i $u_w(t^0)$ związanych z poszczególną parą koło – szyna.*

Zastosowany model kontaktu w formalizmie układów wielocłonowych wymaga do rozwiązania problemu interakcji koło – szyna zdefiniowania w formie parametrycznej geometrii powierzchni będących w kontakcie [1]. Wymaga się aby zastosowane równania powierzchni spełniały dwa postulaty. Po pierwsze, powierzchnie muszą być zdefiniowane w globalnym układzie odniesienia, ponieważ równania ruchu układu wielocłonowego odnoszą się do inercjalnego układu odniesienia. Po drugie, metoda opisu powierzchni ma być ogólna, w tym sensie, że jej równania parametryczne muszą pozwalać przedstawić dowolną, przestrzenną konfigurację zestawu kołowego i szyn dla dowolnego profilu zarówno koła jak i szyny. Definicja geometrii powierzchni kontaktu pomiędzy sztywnym kołem a sztywną szyną opiera się na czterech niezależnych parametrach powierzchni [2]. Do opisu geometrii powierzchni szyny zastosowano parametry tej powierzchni S_r i u_r , podczas gdy S_w i u_w są parametrami zastosowanymi do opisu powierzchni koła, tak jak przedstawiono na rys. 1.



Rys. 2. Parametry stosowane do opisu powierzchni koła i szyny

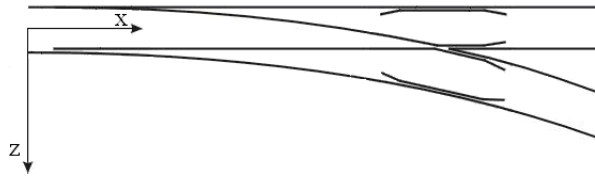
Ze względu na zmianę profili szyn wzdłuż linii toru, tak jak to ma miejsce w przypadku rozjazdów, konieczne jest zdefiniowanie powierzchni każdej z szyn z osobna. Powierzchnia każdej z szyn może być otrzymana jako obwiednia z powierzchni generowanej przez krzywą

płaską, która określa profil szyny, przesuując ją wzdłuż krzywej przestrzennej szyny [2]. W celu sparametryzowania krzywych przestrzennych linii toru należy określić parametr przedstawiający długość kroku ΔL , przyjęty dla konstrukcji bazy danych lewej i prawej szyny. W każdym kroku czasu podczas prowadzenia symulacji dynamicznej program interpoluje liniowo dane, sporządzone oddzielnie dla lewej i prawej szyny, otrzymując wszystkie konieczne informacje do analizy oddziaływań pomiędzy pojazdem a torem. Strukturę bazy danych szyn, uzyskaną z programu przygotowującego dane, przedstawiono w tabelicy 1. Długość kroku ΔL wynika z postaci krzywej linii toru i intensywności zmian profilu szyny.

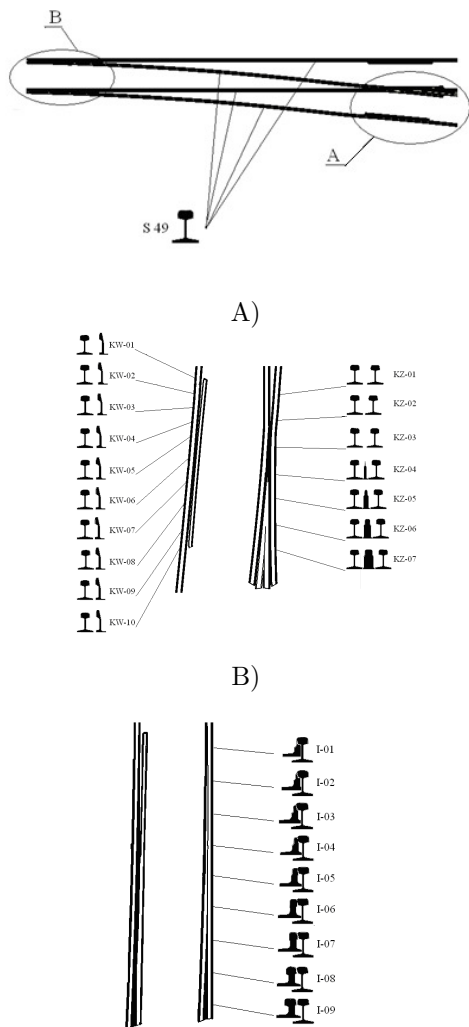
Tabela 1. Struktura bazy danych dla szyny

L	n	x	y	z	t _x	t _y	t _z	n _x	n _y	n _z	b _x	b _y	b _z
0	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,2	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,5	2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...

Ze względu na skomplikowaną procedurę definiowania powierzchni toru w rozjazdach, do wyznaczenia sił kontaktowych w łuku rozjazdu zdecydowano się wybrać jedynie rozjazd zwyczajny, który jest jednym z najczęściej spotykanych rozjazdów stosowanych w polskim kolejnictwie. W pierwszym kroku należało utworzyć model, który ma za zadanie odwzorować rzeczywistą powierzchnię toru z wymaganą dokładnością. Model zawiera szereg uproszczeń o pomijalnym wpływie na rezultat końcowy. Utworzenie geometrii rozjazdu zrealizowano w programie Inventor. Zgodnie z opracowaną metodyką wyznaczania punktu kontaktu w oddziaływaniu koło – szyna do budowy parametrycznej powierzchni szyny potrzebne jest zdefiniowanie linii toru oraz profilu przekroju szyny. Zostało to osiągnięte za pomocą opisu tychże punktów znajdujących się w dwóch układach współrzędnych. Pierwszy układ jest układem globalnym (rys. 2), opisuje linie toru szyn rozjazdu. W drugim układzie współrzędnych, związanym z punktami leżącymi na linii toru, opisano profile szyn.

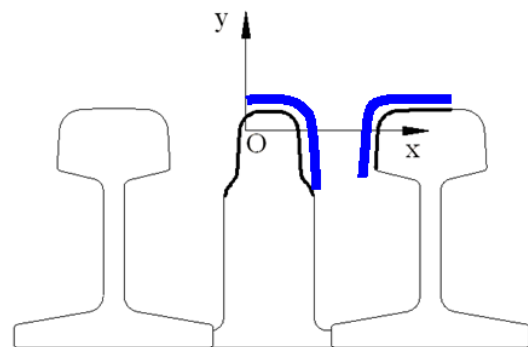
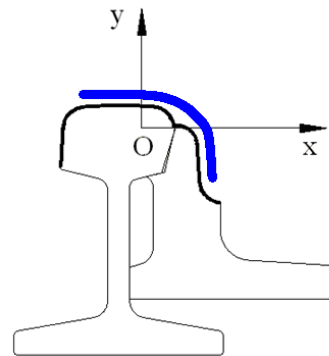


Rys. 3. Położenie globalnego układu współrzędnych w opisie geometrii rozjazdu



Rys. 4. Przekroje poprzeczne szyn w wybranych punktach rozjazdu

Zastosowana formuła do wyznaczenia punktu kontaktu pomiędzy kołem a szyną wymaga opisu obydwu powierzchni jako funkcji wypukłych. Dlatego też uzyskane profile szyn z przekrojów poprzecznych toru w rozjeździe należało zmodyfikować w celu otrzymania wymaganego w opisie kształtu, zachowując jednocześnie punkty, w których może dojść do kontaktu pomiędzy kołem a szyną.



Rys. 5. Odzworowanie profilu powierzchni szyny funkcją wypukłą

- b) Rozwiązanie układu równań nieliniowych w celu otrzymania parametrów powierzchni, które określają współrzędne punktów kontaktu związanych z każdą parą koło – szyna.
- c) Obliczenie sił normalnych w kontakcie, które powstają poprzez wzajemne oddziaływanie na siebie koła z szyną oraz rozmiaru powierzchni kontaktu.

Najbardziej znanym modelem kontaktu, który znalazł zastosowanie również w kolejnictwie, jest model bazujący na teorii sprężystości przedstawiony przez Hertza. Model Hertzowski siły kontaktu jest modyfikowany poprzez wprowadzenie siły tłumienia, co prowadzi do wyrażenia go w postaci [3]:

$$N = K \left(1 + \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{\dot{\delta}}{\delta^{(-)}} \right) \delta^n, \quad (2)$$

gdzie uwzględniono wpływ prędkości zderzenia i współczynnika restytucji na wartość siły kontaktu. Ta formuła opiera się na założeniu braku trwałego wgłębienia na powierzchniach stykających się ciał po oddzieleniu się ich od siebie

- d) Wyliczenie mikropoślizgów i obliczenie sił stycznych mikropoślizgów i momentów spinu, które powstają w wyniku wzajemnego oddziaływania koło – szyna.

W nieliniowym modelu siły mikropoślizgu Polacha [4] styczna siła w kontakcie F spowodowana jest przez wzdłużny i poprzeczny mikropoślizg, jak również przez poprzeczną siłę $F_{\eta S}$, która jest wynikiem wystąpienia spinu. Model ten opisany jest równaniami:

$$F_{\xi} = F \frac{v_{\xi}}{v_C} \quad ; \quad F_{\eta} = F \frac{v_{\eta}}{v_C} + F_{\eta S} \frac{\phi}{v_C} \quad (3)$$

gdzie: F jest styczną siłą kontaktową spowodowaną przez wzdłużny i poprzeczny mikropoślizg, v_C jest modyfikowanym mikropoślizgiem translacyjnym, który uwzględnia efekt spinu, a $F_{\eta S}$ jest poprzeczną siłą styczną wywołaną przez spin. Algorytm Polacha wymaga jako wielkości wejściowych podanie mikropoślizgów v_{ξ} , v_{η} i ϕ , siły normalnej w kontakcie N , pół osi a i b elipsy kontaktu, łączonego moduł sprężystości poprzecznej koła i szyny G , współczynnika tarcia μ oraz współczynników mikropoślizgów Kalkera i spinu C_{ij} .

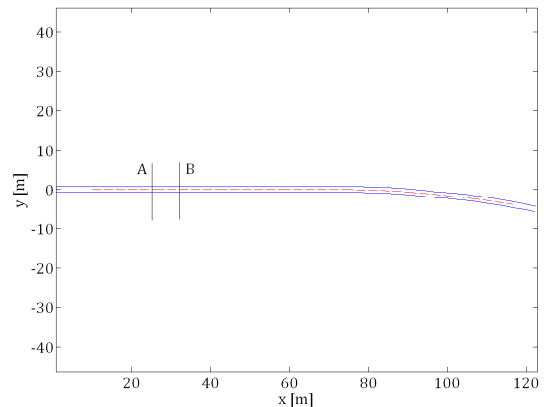
W rezultacie algorytm oblicza wartości składowych sił mikropoślizgu F_{ξ} , F_{η} .

Algorytm Polacha jest wygodny do badania stycznych sił kontaktu powstających w oddziaływaniu koło – szyna. Model ten pozwala obliczyć w pełni nieliniowe siły mikropoślizgu, przy czym pod uwagę w obliczeniach bierze się spin.

- e) Dodanie sił i momentów w kontakcie, powiązanych z każdym kołem, do wektora zewnętrznych sił działających w układzie. Zastosowanie formalizmu układów wielocłonowych w celu otrzymania rozwiązania, nowych położenia i prędkości układu dla kolejnego kroku czasowego.
- f) Uaktualnienie układu dla kolejnej chwili czasu poprzez przyjęcie danych początkowych z kroku poprzedniego celem wyznaczenia parametrów powierzchni powiązanych z każdą parą koło – szyna.
- g) Kontynuowanie całego procesu dla nowego kroku czasowego aż do osiągnięcia czasu końcowego przeprowadzanej analizy.

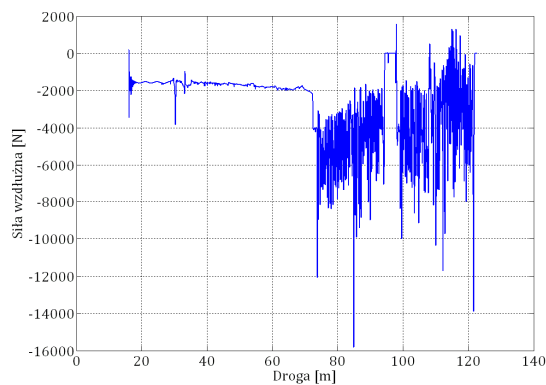
4. SYMULACJA NUMERYCZNA RUCHU POJAZDU SZYNOWEGO W ŁUKU ROZJAZDU KOLEJOWEGO

Zjawiska dynamiczne zachodzące na styku koła z szyną w przypadku przejazdu pojazdu przez rozjazd są znacznie bardziej skomplikowane niż w przypadku jazdy po torach prostych lub w łukach. W wyniku ciągłych zmian w profilach szyn kolejowych oraz nieciągłości w obszarze krzyżownicy dochodzi do wielopunktowego kontaktu generującego siły impulsowe o szerokim spektrum wymuszeń [5]. Przeprowadzono symulacje ruchu pojazdu szynowego w łuku rozjazdu kolejowego (rys. 6) z prędkością krytyczną. W trakcie ruchu pojazdu po torze następowała zmiana nachylenia profilu szyny. W części A toru profil szyny (rys. 6) był nachylony w stosunku 1:20. W części A – B następowało przejście do profilu bez nachylenia, natomiast dla części B toru, czyli w rozjeździe, szyny nie się pochyłone.



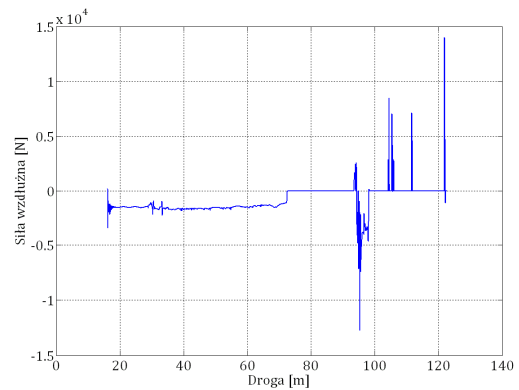
Rys. 6 Współrzędne toru (linie ciągłe) i położenie środka masy pojazdu (linia przerywana) w trakcie przejazdu

Wyniki uzyskane z symulacji numerycznej dla koła lewego w pierwszym zestawie kołowym

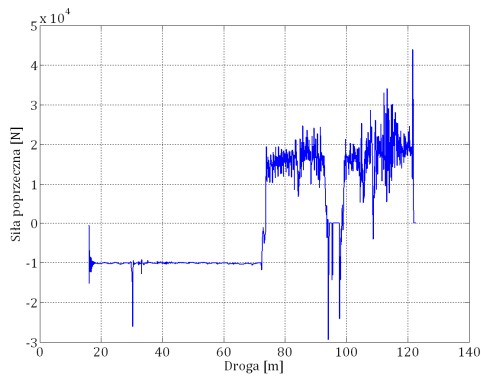


Rys. 7. Siła wzdłużna

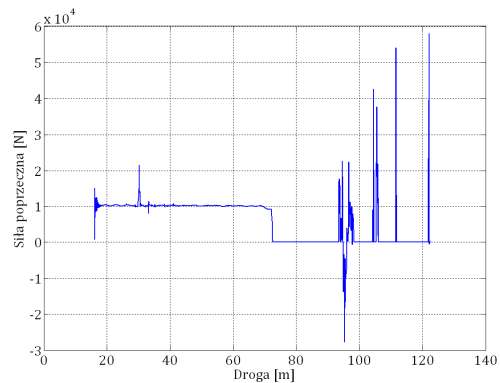
Wyniki uzyskane z symulacji numerycznej dla koła prawego w pierwszym zestawie kołowym



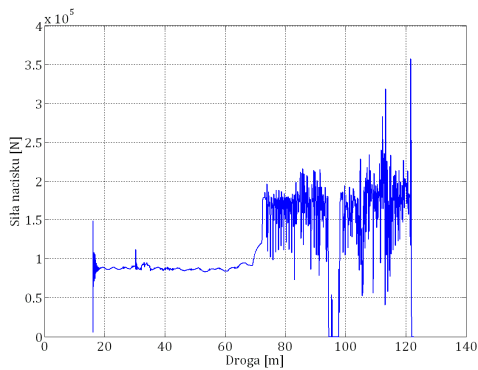
Rys. 8. Siła wzdłużna



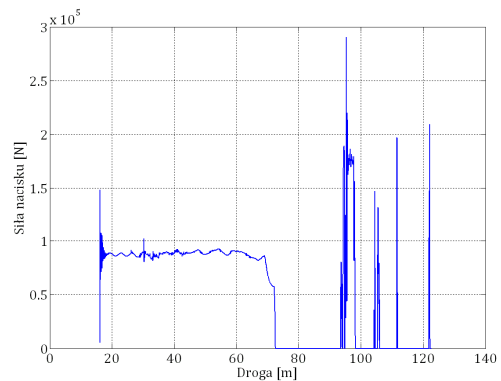
Rys. 9. Siła poprzeczna



Rys. 10. Siła poprzeczna



Rys. 11. Siła nacisku



Rys. 12. Siła nacisku

5. WNIOSKI

Jak przedstawiono na rysunkach 7 – 12, wypadkowa siła działająca na powierzchni styku koło - szyna została rozłożona na składową wzdłużną, poprzeczną i pionową. Stosunek siły poprzecznej Y do siły pionowej Q określa parametr, który jest szczególnie ważny w przewidywaniu możliwości wystąpienia wspinania się koła kołnierzem na szczyt szyny, co jest przyczyną wykolejenia zestawu kołowego pojazdu szynowego, a w konsekwencji całego pojazdu. Zazwyczaj ze zjawie-

skiem tym można mieć do czynienia w ruchu pojazdu w łukach (rozjazdach kolejowych), ale może również wystąpić wtedy, gdy pojazd porusza się z prędkością krytyczną. Wspinanie się koła kołnierzem na szczyt szyny spowodowane jest siłą tarcia, która skierowana jest niemal pionowo do góry. Przypadek ten zachodzi podczas kontaktu przednią częścią kołnierza koła. Wartość współczynnika wykolejenia Y/Q jest zależna od panujących warunków dynamicznych. Przeprowadzenie symulacji numerycznych ruchu pojazdu szynowego w rozjeździe pozwala na otrzymanie w rozwiązaniu

wartości sił kontaktowych informujących o możliwości wystąpienia wykolejenia zestawu kołowego. W praktyce wartość współczynnika Y/Q w zakresie od 0,8 do 1,2 jest uważana za wystarczającą do zaistnienia zjawiska wspinania się koła kołnierzem na szynę. Dopuszczalna

wartość tego współczynnika jest zależna od współczynnika tarcia ślizgowego i kąta natarcia w punkcie styku kołnierza z szyną. Również czas trwania przekroczenia wartości współczynnika wykolejenia ma znaczenie do wystąpienia wykolejenia zestawu kołowego.

Literatura

1. SHABANA A.A, ZAAZAA K.E., SUGIYAMA H.: RAILROAD VEHICLE DYNAMICS. "A COMPUTATIONAL APPROACH" 2007, TAYLOR & FRANCIS/CRC.
2. POMBO, J. AND AMBROSIO, J. AND SILVA M.: A new wheel – rail contact model for railway dynamics. "Vehicle System Dynamics", 2007, Vol. 45, No. 2, p. 165 – 189.
3. LANKARANI H. M. AND NIKRAVESH, P. E. : Contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. ASME JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN 1990, 112, p. 369-376.
4. POLACH O.: A fast wheel-rail forces calculation computer code. "VEHICLE SYSTEM DYNAMICS" 1999, SUPPLEMENT 33, p. 728-739.
5. KASSA E., ANDERSSON C., NIELSEN J.: Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout. "VEHICLE SYSTEM DYNAMICS" 2006, 44(3), p. 247–258.
6. DUDA S.: Simulation of railway vehicle motion on the straight track. Journal of KONES, "Powertrain and transport" 2010, Vol. 17, No. 1, p.117-125.

Publikacja jest wynikiem pracy naukowej finansowanej przez Narodowe Centrum Nauki ze środków na naukę w latach 2011 – 2013, jako projekt badawczy nr 6700/B/T02/2011/40.