

O WPŁYWIE USTEREK TORU NA USZKODZENIA POJAZDÓW SZYNOWYCH¹

Roman Bogacz

prof. dr hab. inż., Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 00-001 Warszawa. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, PAN, ul. Pawińskiego 5B; 02-106 Warszawa

Robert Konowrocki

dr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki, PAN, ul. Pawińskiego 5B; 02-106 Warszawa

Streszczenie. *Praca zawiera omówienie wybranych zagadnień dynamicznych, związanych z kinematycznym wymuszeniem od usterek toru, wpływającym na degradację pojazdów i dalszy rozwój uszkodzeń toru. Wskazano zjawiska, które mogą być przyczyną dużych obciążeń współdziałającego ze sobą układu pojazd-tor oraz zagrożenia wypadkami spowodowanymi zmęczeniem materiału elementów takiego układu. Podano możliwe przyczyny powstawania i rozwoju pęknięć szyn i osi zestawów kołowych. Przedstawiono przykłady badań doświadczalnych wskazujących na występowanie obciążeń dynamicznych znacznie przekraczających obciążenia statyczne pojazdem. W pracy zamieszczono wyniki badań otrzymane z modelu elektromechanicznego napędu, opisujące drgania skrętne zestawu kołowego wywołane przejazdem przez szczeliny w pojedynczym toku szynowym.*

Słowa kluczowe: *dynamika układu koło-szyna, oddziaływanie pojazd-tor, degradacja toru i pojazdów*

Zwiększone wymagania użytkowe, związane ze wzrostem prędkości, wzrostem obciążenia oraz ograniczeniami hałasu, skłania do uwzględniania różnych zjawisk oraz efektów dynamicznych występujących w kolejnictwie. Wzrost wymagań dotyczących pojazdów i infrastruktury oraz wykorzystywanie nowych technologii wymaga również uwzględniania różnych zjawisk wpływających na dynamikę układu pojazd-tor. Obecnie możliwości pomiarów procesów szybkozmiennych pozwoliło na potwierdzenie doświadczalne analiz teoretycznych, że nadwyżka dynamiczna w przypadku okresowego podparcia szyn klasycznym węzłem przytwierdzenia, przy występujących zwykle nierównościach i innych wadach toru może nawet kilkakrotnie przekraczać obciążenie statyczne [1]. W pracy omówiono pewne zjawiska, co do których eksperci kolejnictwa nie mają pełnej wiedzy na temat przyczyn ich powstawania, ze względu na złożoność opisu matematycznego zagadnienia propagacji fal w ośrodkach ciągłych, w tym ośrodkach o strukturach periodycznych [2,3,4]. Wobec powyższego, w wielu analizach przyjmowano nad-

¹ Wkład autorów w publikację: Bogacz R. 55%, Konowrocki R. 45%

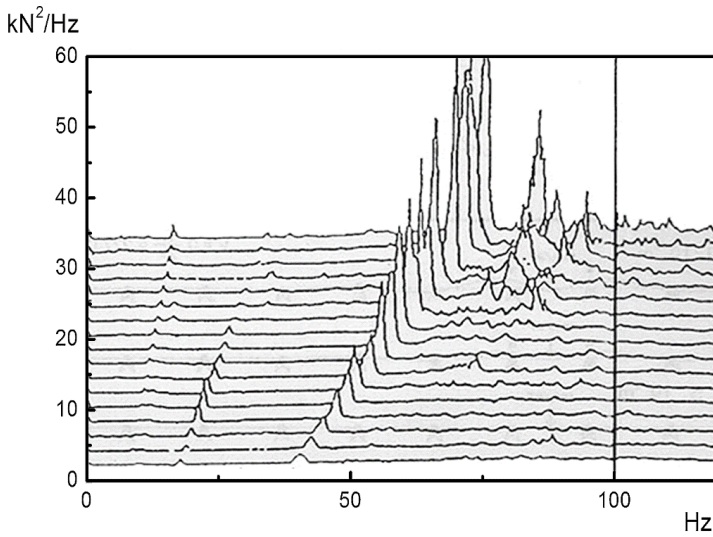
wyżkę dynamiczną szacunkowo na poziomie 15% obciążenia statycznego, w wyjątkowych przypadkach 30%.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na powstawanie usterek w torze kolejowym są drgania samowzbudne. Jako ich źródło należy tutaj wymienić drgania wzbudzone tarciami o nieliniowej charakterystyce tarcia suchego. Drgania te powodują powstawanie fal poślizgowych, a w konsekwencji bardzo szybkiego zmęczenia materiału szyn i osi zestawów kołowych w wyniku skrętnych drgań samowzbudnych zestawów kołowych o częstotliwości około 100 Hz i momencie skręcającym znacznie większym od nominalnego. Zjawisko nadmiernych drgań osi ma dotychczas tylko niemiecką nazwę, „Rollieren”. Niemiecki urząd EBA opracowuje kryteria takiego sterowania momentem napędowym, które ogranicza amplitudę tych drgań w nowo dopuszczanych pojazdach szynowych.

Zużycie szyn dotyczy zwykle utraty profilu poprzecznego w wyniku plastycznego odkształcenia i wytarcia oraz wykruszenia mniejszych lub większych fragmentów szyn. Zwykle uszkodzenia szyn są zapoczątkowane przez defekty węzłów przytwierdzenia, ale często jest to wynik naturalnego dynamicznego oddziaływania struktury okresowej toru z pociągiem jako ruchomym źródłem obciążenia. Wykazano to przez badaczy ze Szwecji (Dahlberg) i Japonii (Sato) dzięki opanowaniu metod eksperymentalnego pomiaru szybko zmiennego naprężenia [1,5]. Wyniki z tych badań oraz pomiarów podano na rys. 1 i 2. W przypadku badań nacisku kół pojazdu na powierzchnię toczną szyny, wymuszonego okresowym rozkładem podkładów, zmieniano prędkość pojazdu co 5 km/godz., zaczynając od prędkości 95 km/godz. Pomiar siły kontaktowej dokonywano przy przejeździe przez kosinusoidalne zagłębienie o długości 1000-krotnej głębokości (długości 1 m w przypadku 1 mm zagłębienia).

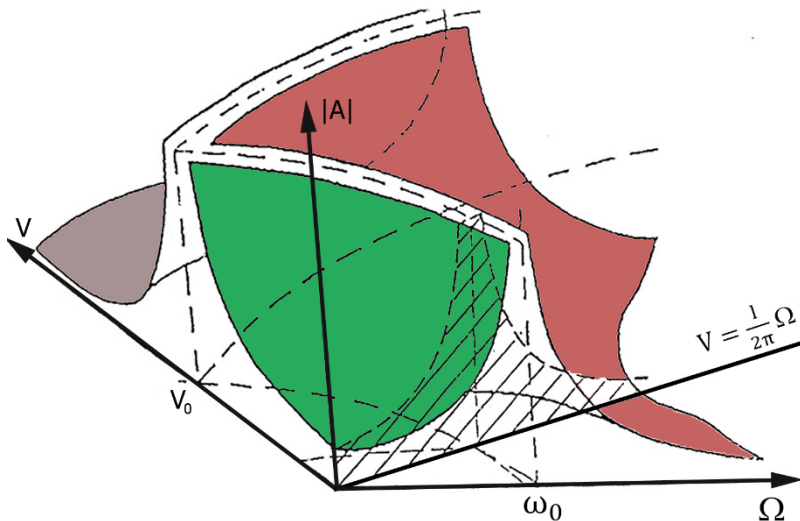
2. Uszkodzenia będące skutkiem efektów dynamicznych układu koło-szyna

Jak już wspomniano dopiero pod koniec XX wieku zaistniała możliwość dokonywania pomiaru szybko zmieniającego się naprężenia, które może powodować powstawanie falistego zużycia (korugacji) na powierzchni tocznej szyny, jako wynik odkształceń plastycznych oraz pęknięć w ich strukturze. Kilkakrotne obciążenie statyczne powodowane może być wymuszeniem kinematycznym. Na rys. 1. widoczne są wyniki pomiarów obciążeń generowanych przez okresowy rozkład podkładów, który przy prędkości ok. 160 km/godz. wywołuje drgania rezonansowe układu koło-szyna.



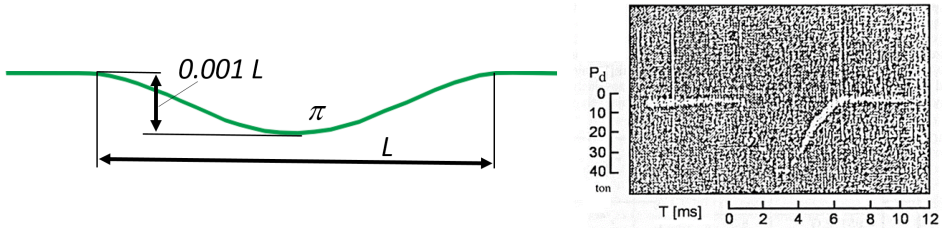
Rys. 1. Dynamiczne obciążenie toru - w funkcji częstotliwości przy prędkości $95 + 5n$ {km/godz} {1}

Zaczym udało się potwierdzić zjawisko rezonansu w Szwecji, doświadczalnie przewidywano jego występowanie w wyniku analizy teoretycznej zjawisk falowych w układach ciągłych i strukturach okresowych [2,3,6]. Jeden z wykresów ilustruje amplitudę drgań lub fal w funkcji prędkości jazdy pociągu V i częstotliwości kinematycznego wymuszenia - Ω , z zaznaczonym rezonansem układu okresowego (związanego z rozkładem podkładów).



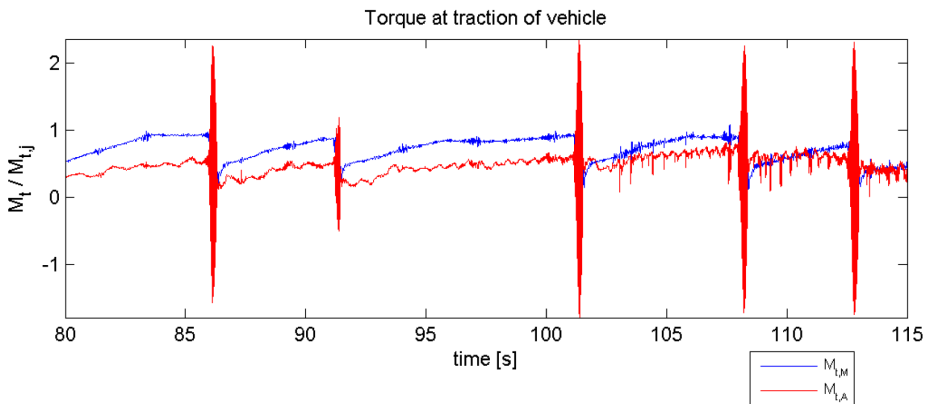
Rys. 2. Obszary różnych rozwiązań falowych (amplituda w funkcji prędkości V i częstotliwości Ω z zaznaczonym rezonansem układu okresowego) {2,7}

Innym przykładem kinematycznego wymuszenia, które zostało zaproponowane i zrealizowane doświadczalnie przez prof. Y. Sato z Instytutu Kolejnictwa Japonii (the Railway Technical Research Institute, RTRI) jest kosinusoidalne wymuszenie o zagłębieniu $1/1000$ długości nierówności szyny. W tych badaniach stosowano zagłębienia $h=1$ mm i długości $L=1$ m w przypadku pociągów dużych prędkości lub $L=0,5$ m i $h=0,5$ mm w przypadku pociągów klasycznych i podmiejskich. Kształt nierówności i rezultat pomiarów obciążenia w czasie ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Nierówność szyny i szybkozmienna siła w kontakcie koło-szyna {ton} w funkcji czasu {ms} {5}

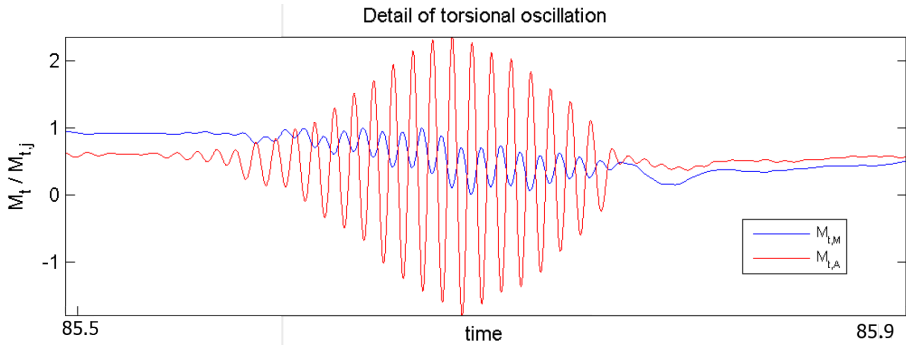
Kolejnym przypadkiem wymuszenia szkodliwych skrętnych drgań zestawów kołowych o wysokiej częstotliwości jest wcześniej wymienione zjawisko „Rolliren”. Wywołuje ono wzrost momentu skręcającego znacznie przekraczającego moment nominalny. Jeden z wyników eksperymentalnych pomiarów podanych m. in. w pracy [8] ilustruje rys. 4. Pomiarzy przeprowadzono na pojeździe szynowym napędzanym asynchronicznymi silnikami trakcyjnymi. Próby testowe przeprowadzono na prostym torze i na łuku o małym promieniu z przechyłką. Pomiarzy przeprowadzono w różnych warunkach toru (suchego / mokrego). Do pomiaru momentu obrotowego na osi i momentu obrotowego dostarczanego do zestawu kołowego wykorzystano czujniki tensometryczne.



Rys. 4. Wynik eksperymentalnego pomiaru momentu napędowego $M_{t,m}$ oraz momentu skręcającego na osi $M_{t,A}$ odniesionego do moment nominalnego $M_{i,j}$ {8}

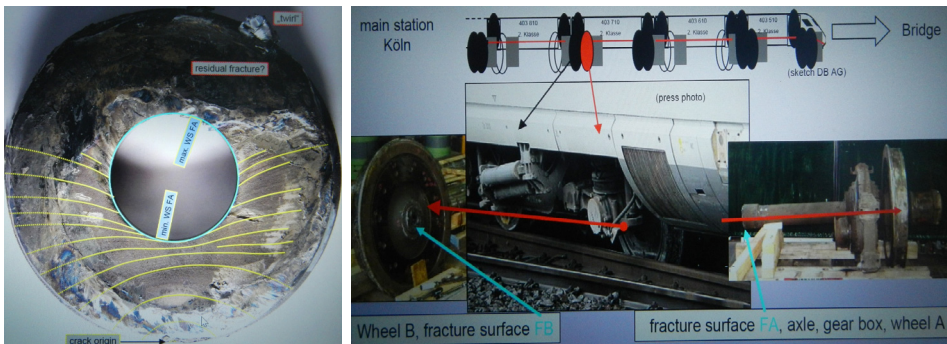
Wykres na rysunku 4 pokazuje typowe przebiegi momentu obrotowego, dostarczanego przez silnik asynchroniczny do zestawu kołowego $M_{t,m}$ i momentu skręcającego na osi $M_{t,A}$ gdy następuje utrata przyczepności koła w wyniku najazdu na

nierówność szyny lub wjazdu na mokry tor. Na rys. 5 pokazano powiększony fragment ilustrujący pojedynczą oscylację wzbudzenia drgań skrętnych zestawu kołowego. Wartości momentu obrotowego są znormalizowane z momentem nominalnym $M_{t,j} = 53 \text{ kNm}$ dostarczonym do zestawu kołowego z maksymalną siłą trakcyjną. Wyniki pokazują, że przy występowaniu drgań skrętnych wielkość momentu skrętnego osi jest kilkakrotnie większa niż jego wartość nominalna podczas zerwania przyczepności zestawu kołowego. Widoczne są chwilowe maksymalne wartości momentu skręcającego w zakresie od $-91,3$ do $+117,8 \text{ kN}$ jako wynik skrętnych drgań samowzbudnych o częstotliwości około 93 Hz . Czas oscylacji skrętnej zależy od prędkości regulacji sterownika silnika trakcyjnego. Układ sterowania ograniczający tego typu drgania jest bardziej efektywny w przypadku napędu elektrycznego aniżeli w przypadku napędu spalinowego, co jest związane z większą bezwładnością takiego napędu. Badania układów sterowania nadal są kontynuowane.



Rys. 5. Powiększony fragment przebiegu momentu napędowego $M_{t,m}$ oraz momentu skręcającego na osi $M_{t,A}$ znacznie przekraczającym moment nominalny $M_{t,j}$ {8}

Zmęczenie materiału osi spowodowane wzrostem momentu skręcającego, ilustrowanym na rys. 4 i 5, którego wartość w chwilach poślizgu znacznie przekraczała moment dopuszczalny, może skutkować ukłóceniem osi zestawu kołowego. Takie zjawisko było przyczyną katastrofy 9.07.2008 r. na trasie Koeln-Düsseldorf w Niemczech [7]. Wykolejony wagon oraz przełom uszkodzonej osi ilustruje rys. 6.



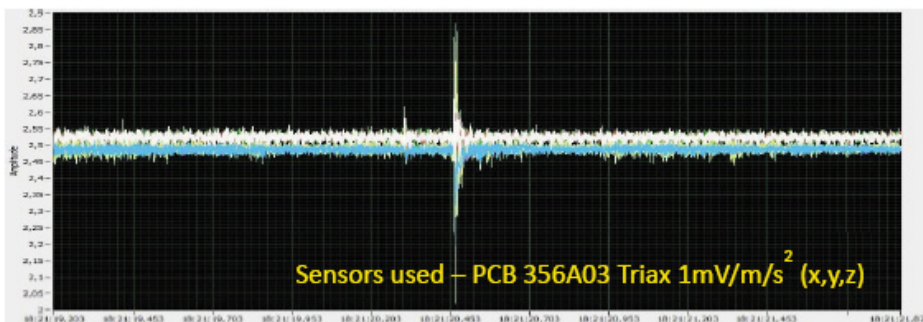
Rys. 6. Uszkodzenie osi zestawu kołowego w wyniku katastrofy dn. 9.07.2008 r. na trasie Koeln-Düsseldorf w Niemczech {9}

Uszkodzenia elementów pojazdów szynowych są bardzo często spowodowane wadliwym łączeniem szyn w przypadku połączeń toru stykowego, uszkodzonymi podkładami lub niewłaściwymi węzłami przytwierdzenia. Na rys. 7. widoczne są usterki toru w postaci nadmiernych szczelin, powodujące cierno-plastyczne zużycie szyny w okolicy sąsiedniego węzła przytwierdzenia. Takie zużycia powierzchni toczonej szyny wynikają z uderzenia koła napędowego o ubytek, odbicia i ponownego uderzenia z większą prędkością obrotową po uprzedniej utracie kontaktu. Przyspieszenie zarejestrowane przez czujniki przyspieszenia, zamontowane na obudowie łożyska zestawu kołowego podczas przejazdu przez szczelinę, jako dynamiczną reakcję koła przejeżdżającego przez szczelinę podano na rys. 8.



Rys. 7. Przykład wadliwego połączenia szyn i uszkodzeń toru jako rezultat tej wady

Przedstawione w niniejszej pracy usterki powodują zarówno degradację toru, jak i współdziałających pojazdów szynowych, nawet w przypadku, gdy nie następuje wykolejenie. Jako ekstremalny przypadek należy uznać przypadek toru, w którym brakuje kilkadziesiąt centymetrów szyny (rys. 9.).

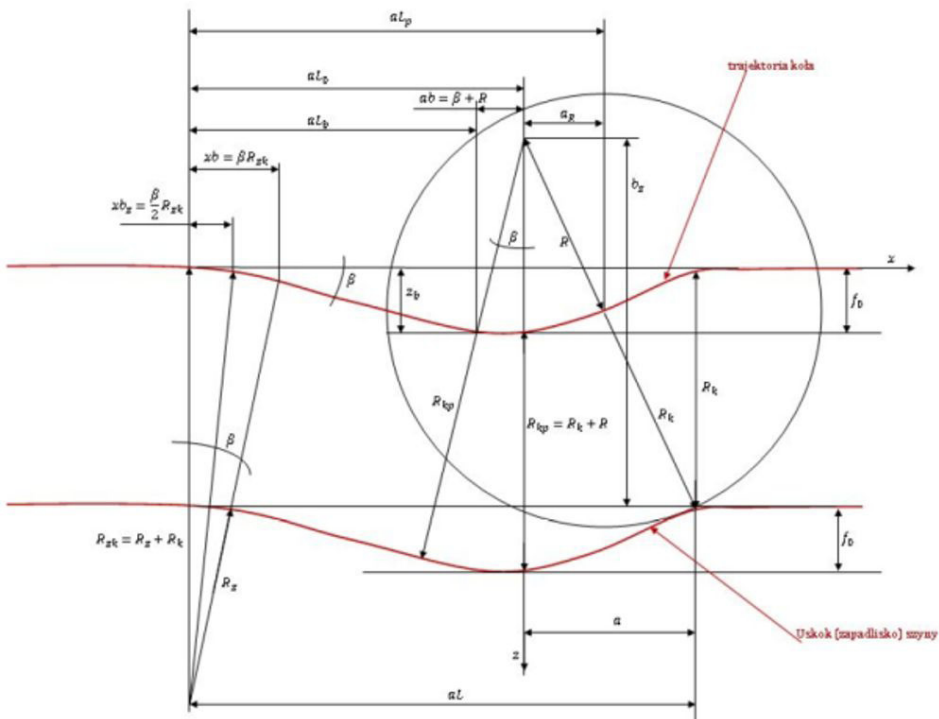


Rys. 8 . Przyspieszenie pionowe na obudowie zestawu kołowego podczas przejazdu koła przez połączenie szyn



Rys. 9. Widok kilkudziesięciocentymetrowego ubytku szyny w torze zarejestrowany podczas jazdy przez kamerę zamontowaną na pojeździe szynowym

Analizę dynamiczną przejazdu po wadliwym torze stykowym można znaleźć m.in. w pracach [7,9,12]. W cytowanych pracach podane są również obciążenia toru w przypadku przejazdu przez tor z różnymi szczelinami, w zależności od prędkości przejazdu i obciążenia statycznego liczonego na koło pojazdu. Na rys. 10 podano schemat zależności geometrycznych w przypadku przejazdu koła przez połączenie szyn zadaną szczeliną, bez uwzględniania odkształceń szyny. Na rys. 11 podano widok szyny ze śladem dynamicznego kontaktu z kołem, powodującego jej uplastycznienie.



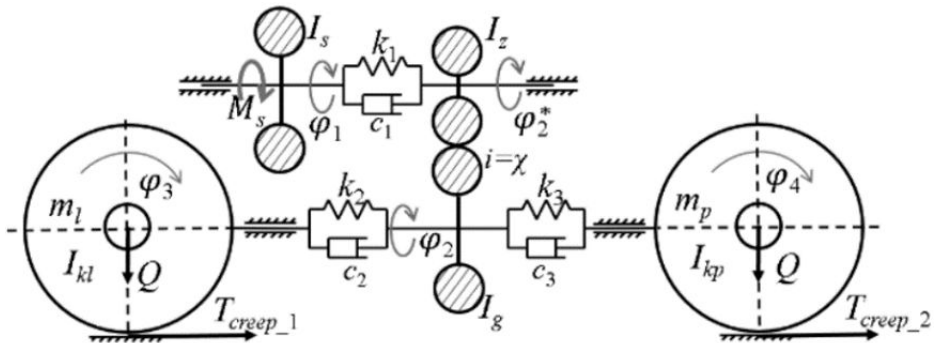
Rys. 10. Schemat zależności geometrycznych przejazdu koła przez tor z ubytkiem szyny



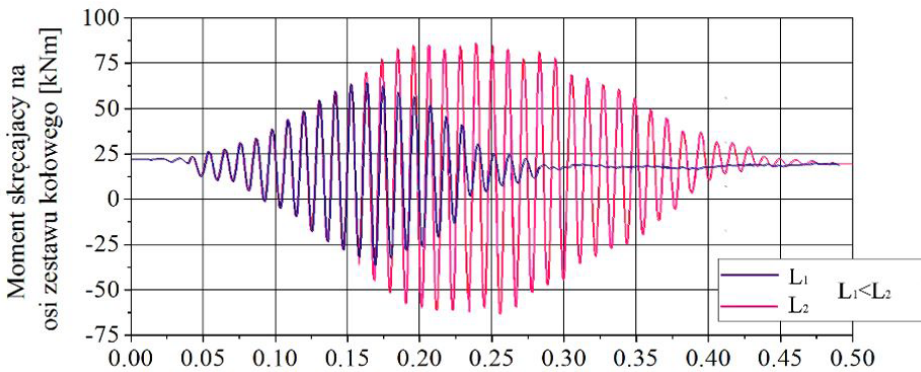
Rys. 11. Widok plastycznej deformacji szyny spowodowanej uderzeniem koła kolejowego

3. Dynamiczny model napędu pojazdu szynowego

Obecnie kompleksowe badanie układu pojazd-tor, z uwzględnieniem oddziaływania elektromechanicznego napędu, można uzyskać za pomocą symulacji komputerowych [13]. Takie symulacje numeryczne pojazdów szynowych wymagają implementacji modelu matematycznego pojazdu w programie komputerowym, który opisałby badane zjawisko z odpowiednią precyzją oraz danych wejściowych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki uzyskane z wykorzystaniem modelu numerycznego napędu pojazdu szynowego opisanego w pracy [14]. Schemat tego modelu napędu ilustruje rys. 12, a nowe wyniki uzyskane z jego wykorzystaniem podano na rys. 13. Do modelu przyjęto parametry zestawów kołowych, wyznaczonych eksperymentalnie z pracy [15]. Wykorzystując ten model oraz uwzględniając scenariusz utraty kontaktu w wyniku ubytku w torze kolejowym otrzymano odpowiedź układu w postaci trajektorii zmiany momentu skręcającego na zestawie kołowym. Eksperymenty numeryczne przejazdu wykonano przy 2. wartościach długości szczeliny L w torze kolejowym na pojedynczym toku szynowym, który w użytym modelu był traktowany jako obniżenie współczynnika tarcia $\mu = 0,36$ do wartości zero w strefie kontaktu prawego w jednym kole, trwającego odpowiednio do długości szczeliny w toku szynowym 0.3 s oraz 0.26 s. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem szczeliny w torze, wartość amplitudy drgań skrętnych wzrasta znacząco w stosunku do statycznego momentu napędowego, będącego w rozpatrywanym przypadku na poziomie 24 kNm. Wynika z tego, że oprócz impulsowego wzrostu obciążenia pionowego w strefie kontaktu koło-szyna, wynikającego z przejazdu przez ubytek w szynie, w takim przypadku wzrastają również wartości momentu skręcającego, mogące wywołać zmęczeniowe uszkodzenie osi zestawu kołowego lub obluźwienia koła na osi.



Rys. 12. Schemat modelu napędu pojazdu szynowego użyty do badań numerycznych [14]



Rys. 13. Wyniki numeryczne drgań skrętnych osi zestawu kołowego podczas utraty przyczepności z szyną na jednym z kół

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dynamiczne związane z samowzbudnością i kinematycznym wymuszeniem wskazujące na zjawiska, które mogą być przyczyną dużych obciążeń toru i jego degradacji oraz zmęczenia osi zestawów kołowych. Zasygnalizowane zostały prawdopodobne przyczyny powstawania dużych obciążeń szyn kołami kolejowymi, wielokrotnie większych od powszechnie uznawanych za realne.

Podano kilka przykładów eksperymentalnego zbadania dynamicznego oddziaływania zestawów kołowych z torem, będącego alternatywnym podejściem do kinematycznego wyjaśniania tego zjawiska.

Jako dowód na duże dynamiczne obciążenie toru wzbudzanego kinematycznie podano wyniki badań szwedzkich i japońskich, prowadzonych przed ponad dwudziestu laty pod kierunkiem prof. Dahlberga i prof. Y. Sato.

Bibliografia

- [1] Dahlberg, T., Vertical Dynamic Train/Track Interaction - Verifying a Theoretical Model by Full-Scale Experiments *Veh. Sys. Dyn.* 27, 2007, pp. 45-57.
- [2] Bogacz R., Krzyżyński T., Popp K., On the generalization of Mathews problem of the vibration of a beam on elastic foundation, *Z. angew. Math. Mech.* 69:8, 1989, pp. 243-252.
- [3] Bogacz R., Krzyżyński T., Popp K., Application of Floquet's theorem to high-speed train/track dynamics, DSC-vol.56/DE/vol.86, Advanced automotive technologies, ASME Congress 1995, pp. 55-61.
- [4] Bogacz R., Czyczuła W., Konowrocki R., Effect of periodicity of railway track and wheel-rail interaction on wheelset-track dynamics, *Archive of Applied Mechanics*, ISSN: 0939-1533, Vol.85, 2015, pp.1321-1330.
- [5] Sato Y., Japanese studies on deterioration of ballasted track. *Veh. Syst. Dyn.* 24, 1995, pp. 197-208.
- [6] Bogacz, R., On Recent Investigations in Dynamics of Continuous Systems Subjected to Travelling Loads *Machine Dynamics Problems*, 2007, Vol. 31, No 2, pp. 7-12.
- [7] Bogacz R., Kurnik W., On self-excitation and kinematic excitation of railway track and rail vehicle, 9th German-Greek-Polish Symposium, Chania, Sept. 4-9.2016.
- [8] Jára M., Introduction to the Influence of Torsional Oscillation of Driving Wheelsets to Wheel/Axle Press-fitted Joint, Conference proceedings of Student's Conference STC, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, April 20, 2017, p. 1-7.
- [9] Konop J., Dynamika układu pojazd szynowy - tor. Badania symulacyjne i eksperymentalne. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, SiMR, 2015.
- [10] Bogacz R., Frischmuth K., On some new aspects of contact dynamics with application in railway engineering. *J. Theor. and Appl. Mech.*, Vol. 50.1, 2012, pp. 119-129.
- [11] Bogacz, R., Konop, J. On dynamical effects in high-speed train-track systems. *Proc. Polish-Georgian Conference, Transport Bridge Europe-Asia, Kutaisi*, 2014, pp. 75-80.
- [12] Konop J., Konowrocki R., On Evaluation of the Wheelsets-Track Interaction Quality in Railway Engineering, *Machine Dynamics Research*, Vol.37, No.4, 2013, pp. 5-14.
- [13] Duda S., Numerical simulations of the wheel-rail traction forces using the electro-mechanical model of an electric locomotive, *J. Theory. Appl. Mech.* 52:2, 2014, pp. 395-404.
- [14] Konowrocki R., Szolc T., An analysis of the self-excited torsional vibrations of the electromechanical drive system, *Vibrations in Physical Systems*, Vol.27, 2016, pp.187-194.

-
- [15] Konowrocki R., Walczak S., Influence of flexibility parameters of wheels and wheelset on the railway bogie dynamics-experimental and theoretical investigations, *Machine Dynamics Research*, ISSN: 2080-9948, Vol.4, No.2, 2017, pp. 41-53.

