

## ANALIZA WYBRANYCH EFEKTÓW DYNAMICZNYCH W TORZE KOLEJOWYM<sup>1</sup>

---

**Roman Bogacz**

prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego. Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, Instytut Pojazdów, e-mail: rbo-gacz@ippt.gov.pl

**Włodzimierz Czyczula**

prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: (12) 6282358, e-mail: czyczula@pk.edu.pl

---

*Streszczenie: Artykuł dotyczy analizy wybranych efektów dynamicznych, które powinny zainteresować ekspertów oraz inżynierów i badaczy infrastruktury kolejowej. Niektóre zjawiska dynamiczne występujące w oddziaływaniu pojazdów szynowych małych i dużych prędkości z torrem są złożone i z tego względu nie są powszechnie znane. W niniejszej pracy podajemy przegląd wybranych zagadnień i przykładowych wyników symulacji komputerowej oraz wyników badań doświadczalnych.*

*Słowa kluczowe: dynamika toru, korugacja, rezonans*

### 1. Wstęp

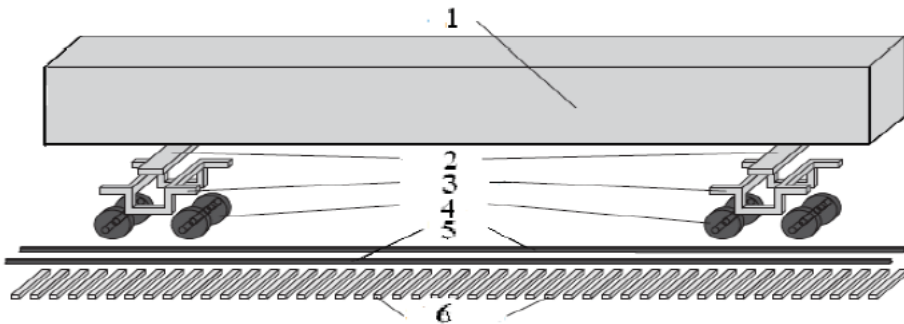
Z przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacyjnych wynika, że parametry charakteryzujące stan toru i pojazdu szynowego mają zasadniczy wpływ na ich dynamiczne oddziaływanie, które po przekroczeniu pewnych wartości uznawanych za krytyczne mogą lawinowo rosnąć. Dobrym przykładem mogą być efekty towarzyszące korugacji szyn. Parametrami istotnie wpływającymi na intensywność naprężeń kontaktowych i dalszy rozwój korugacji są m.in.: prędkość jazdy, amplituda i długość fali nierówności i inne. Zjawisko to przez długi czas nie było zauważane (nie przywiązywano do niego należytej uwagi) ze względu na trudności w identyfikacji naprężeń i odrywania się koła od szyny. Innym przykładem jest wzrost obciążeń dynamicznego oddziaływania układu pojazd-tor związany z okresowym ułożeniem podkładów kolejowych. Pomiar tych sił nastąpił dopiero pod koniec ubiegłego wieku (w przypadku klasycznych parametrów przytwierdzenia szyny i rozkładu podkładów rezonans występuje przy prędkości około 160 km/godz.). Następnie można wymienić wyniki badań symulacyjnych i pomiarów doświadczalnych zjawiska falistego zużycia – korugacji. Na uwagę zasługuje również rozbieżność pomiędzy rzeczywistym obciążeniem dynamicznym a pozornym, które jeszcze często można znaleźć w literaturze.

---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Bogacz R. 50%, Czyczula W. 50%

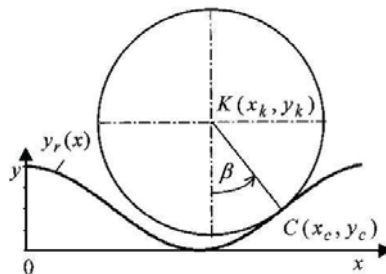
## 2. Badania symulacyjne

Do badań symulacyjnych oddziaływania pojazdu szynowego z torem wykorzystujemy zwykle model układu pojazd szynowy - tor przedstawiony na rysunku 1, który pozwala na uwzględnienie oddziaływania pojazdu z torem w niskim zakresie częstotliwości. Układ składa się z pudła wagonu - 1, belek bujających - 2, ram wózka - 3, zestawów kołowych - 4, szyn - 5 oraz podkładów - 6. Takie modelowanie pojazdu pozwala na uwzględnienie geometrycznego stanu toru (łuki, krzywe przejściowe, zmienność przechyłki, rozstawu szyn itp.).



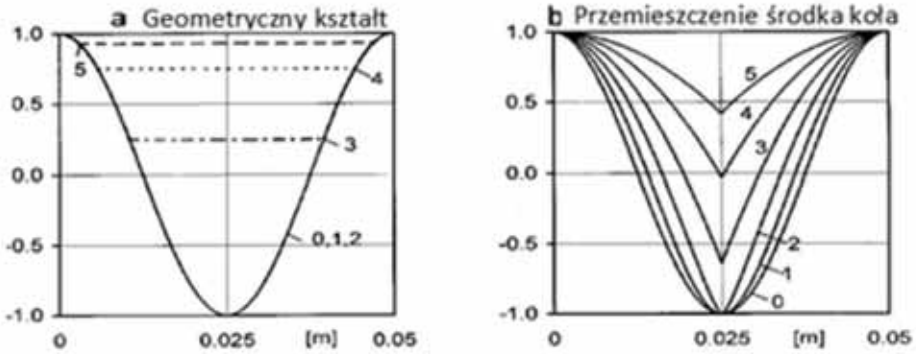
Rys. 1. Schematyczny model układu pojazd szynowy - tor

Model przedstawiony na rys. 1 jest zbyt rozbudowany, aby przeprowadzać analizę dynamiczną wysokoczęstotliwościowych procesów podukładu koło–szyna lub ich symulację. Względnie wolno zmieniające się przemieszczenia lub obciążenia można założyć jako stałe w krótkim czasie badania procesów szybkozmiennych, np. w przypadku badania dynamiki z uwzględnieniem korugacji szyn lub kół kolejowych. Przykładem uproszczonego podukładu może być schemat przedstawiony na rys. 2. Przyjmując, że koło i szyna są podatne tylko w obszarze styku w zakresie drgań o wysokiej częstotliwości oraz amplitudzie wynoszącej kilkadziesiąt mikrometrów możemy w sposób przybliżony określić sztywność kontaktową wykorzystując teorię Herza [1]. Dalsze bardziej doskonałe przybliżenie uzyskamy uwzględniając oprócz podatności kontaktowej podatność tarczy koła [2], a następnie uwzględniając zmienną prędkość położenia kontaktu (punktu) otrzymamy jakościowo nowe rezultaty opisane w pracy [3].

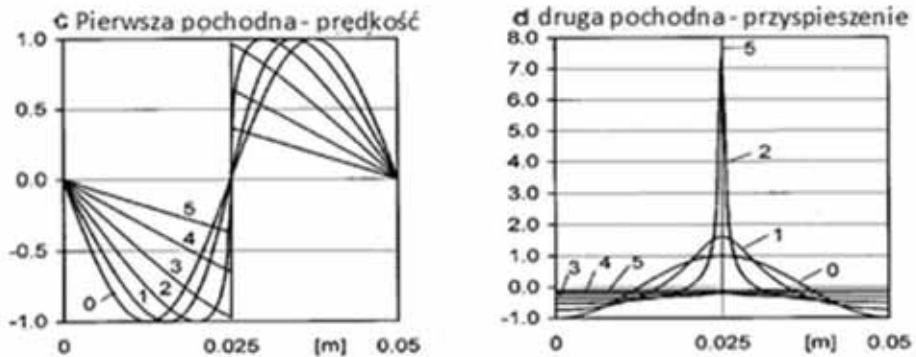


Rys. 2. Schemat kontaktu koła ze skorugowaną powierzchnią szyny (o wielokrotnie powiększonej amplitudzie)

Zakładając wstępnie nieodkształcalność koła i szyny oraz brak możliwości utraty kontaktu możemy w przypadku cosinusoidalnego kształtu nierówności wyznaczyć zakres kontaktu, przemieszczenia środka koła oraz prędkość i przyspieszenie w kierunku pionowym. Parametry te podano wykreslnie na rys. 3a i 3b.



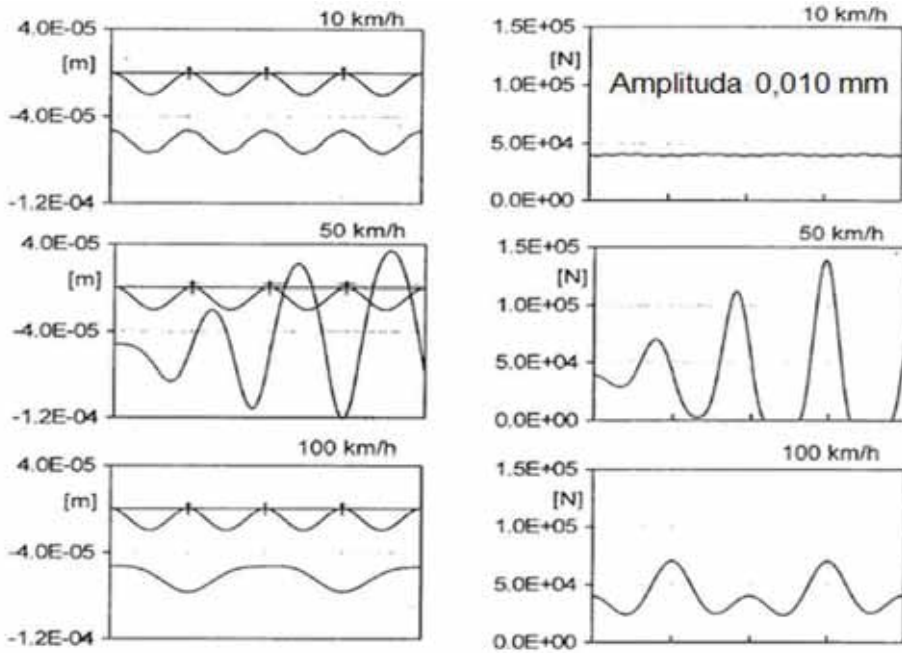
Rys. 3a. Geometria nierówności (cosinus) o długości fali 50 mm i przemieszczenia pionowe środka koła



Rys. 3b. Prędkość i przyspieszenie środka koła przy sześciu różnych wartościach amplitudy nierówności o idealizowanym kształcie cosinus i długości 50 mm

Na rysunkach 3a oraz 3b przyjęto bezwymiarową amplitudę nierówności, co umożliwia analizę falistości o różnej amplitudzie. Podane zależności mają charakter pomocniczy ze względu na pominięcie odkształcalności kontaktowej. Charakterystyczny jest fakt, że tylko przy małych wartościach amplitudy falistego zużycia (0, 1 i 2) nie dochodzi do uderzenia we wnoszącą się część nierówności.

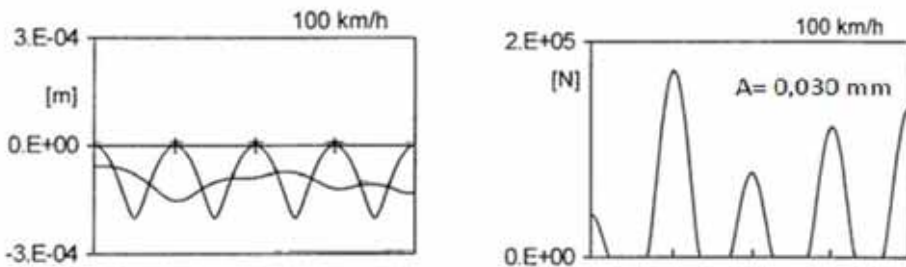
W wyniku badań symulacyjnych mniej uproszczonego modelu z uwzględnieniem podatności kontaktowej uzyskujemy rezultaty przedstawione na rys. 4 w przypadku prędkości 10, 50, i 100 km/godz. oraz amplitudy korugacji 0,010 mm. Na rys. 5 podany został przypadek amplitudy fali 0,030 mm i prędkości 100 km/godz.



Rys.4. Przeszczenia koła i wartości sił kontaktowych przy  $A = 0,010$  mm i prędkości 10, 50 i 100 km/godz.

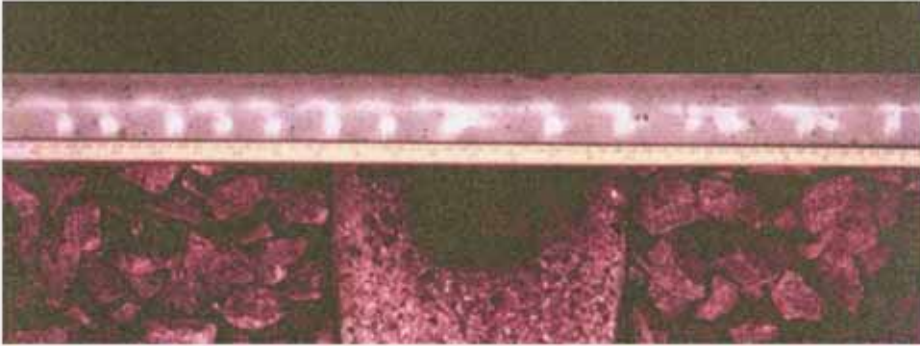
Możemy zauważyć, że przy prędkości 50 km/godz. występuje rezonans kontaktowy doprowadzający do utraty kontaktu. Dalszemu wzrostowi prędkości towarzyszy zmniejszanie wartości sił kontaktowych i brak utraty kontaktu. Przypadek odpowiadający takiemu przebiegowi przy prędkości 100 km/godz. jest przedstawiony jako trzeci przypadek na rys. 4.

Zwiększenie prędkości pojazdu szynowego umożliwi zmniejszenie amplitudy drgań w ograniczonym zakresie amplitud korugacji. Przykładem może być przypadek przedstawiony na rys. 5 o amplitudzie 0,030 mm. Widoczne są zarówno duże wartości sił kontaktowych przy prędkości 100 km/godz., jak i utrata kontaktu koła z szyną.



Rys. 5. Przeszczenia koła oraz wartości sił kontaktowych przy  $A = 0,030$  mm i prędkości 100 km/godz.

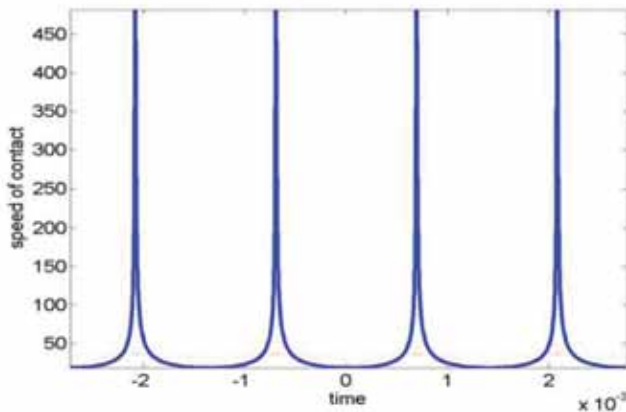
Zalecenia DB i innych kolei europejskich zalecają szlifowanie likwidujące falistość szyn w przypadku osiągnięcia amplitudy  $A = 0,050$  mm. Widok szyny o takim zużyciu ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Widok szyny o amplitudzie korugacji (zużycia falistego) około 0,050 mm

Inicjacja falistości szyn następuje zwykle nad podkładem, gdzie podatność jej jest najmniejsza, w szczególności w przypadku niepoprawnego doboru sztywności węzła przytwierdzenia. Zbyt sztywne przytwierdzenie szyn miało miejsce również na liniach kolejowych technologicznie zaawansowanych krajach europejskich, co wymagało korekty już po dwóch latach eksploatacji.

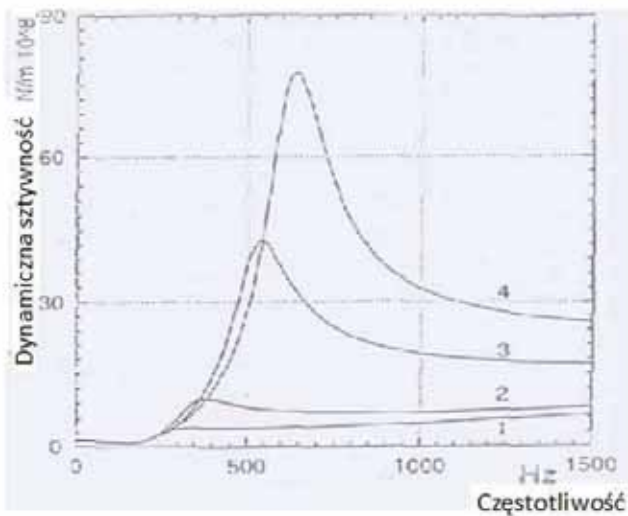
Jedną z istotnych przyczyn późnego zbadania zjawiska korugacji i związanego z tym dynamicznego przeciążenia, które na szynie może ponad dwukrotnie przekraczać obciążenie statyczne jest do niedawna niemożliwy pomiar siły kontaktowej i utraty kontaktu. Obecnie wyniki badań symulacyjnych zostały potwierdzone eksperymentalnie. Istotną przyczyną rozwoju falistości jest duża prędkość przemieszczania punktu kontaktu koła po falistej szynie. Jak widać na szkicu pokazanym na rys. 2 prędkość tego punktu oscyluje wokół prędkości środka koła. Na rys. 7 podany został przebieg zmiany tej prędkości [3].



Rys. 7. Przebieg zmiany prędkości punktu kontaktu układu koło – szyna w czasie [3]

Wątpliwości budzą jeszcze niepotwierdzone eksperymentalnie wyniki dotyczące sztywności dynamicznej węzłów przytwierdzenia w zakresie wyższych częstotliwości (kilkaset Hz). Z analizy teoretycznej wynika, że przy złym doborze sztywności statycznej (lub quasi-statycznej) węzła przytwierdzenia, dynamiczna sztywność może osiągać kilkudziesięciokrotną wartość sztywności statycznej. Zasadnicze wyniki analizy struktury okresowej toru dotyczące sztywności dynamicznej uzyskane w pracy w pracy [4] zostały podane na rys. 8.

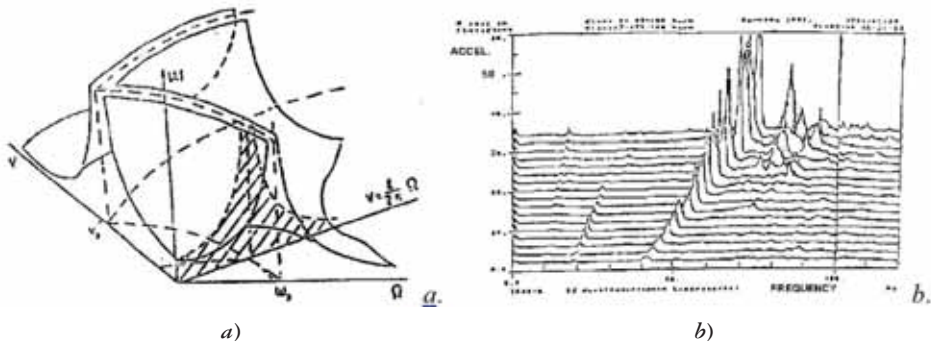
Następnym efektem dotyczącym dynamicznego oddziaływania układu pojazd szynowy- tor, jest kilkakrotny wzrost siły kontaktowej związany z okresowym rozkładem podparcia szyn (podkładów). Zgodne, zarówno z teoretycznego, jak i eksperymentalnego punktu widzenia są stwierdzenia, że rezonansowe drgania kinematycznie wymuszone okresowym ułożeniem podkładów mogą powodować występowanie sił kontaktowych wielokrotnie przekraczających obciążenie statyczne. Złożoność, zarówno analizy teoretycznej, jak i pomiarów eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym tłumaczy brak rozpowszechnienia wiedzy na ten temat.



Rys. 8. Dynamiczna sztywność w zależności od częstotliwości przy dwu-, trzy-, i czterokrotnie większej sztywności statycznej

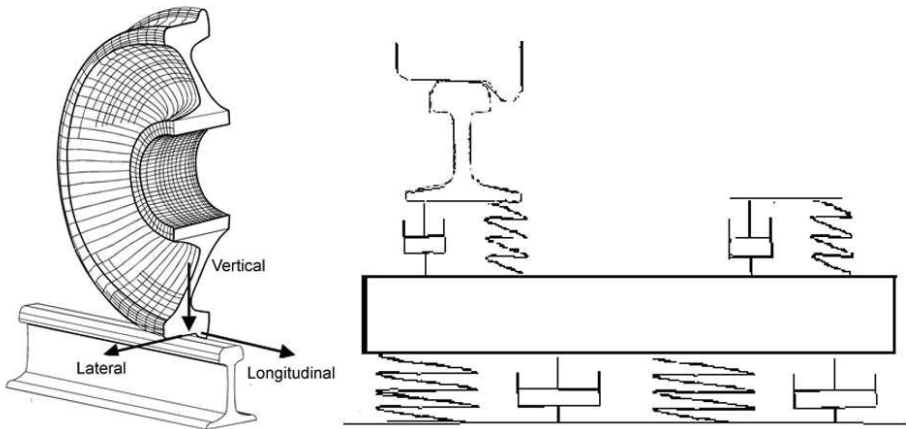
### 3. Badania eksperymentalne

Pierwsze znane autorom niniejszego artykułu badania doświadczalne potwierdzające wyniki badań teoretycznych dotyczące ruchomego i oscylującego obciążenia zostały pomierzone przez firmę ABB w Szwecji i upowszechnione pod koniec ubiegłego wieku.



Rys. 9. Rezultaty badań teoretycznych: a) I eksperymentalnych, b) Kwadrat przyspieszeń (siły) przy prędkości  $V = 95 + n \times 5$  km/h

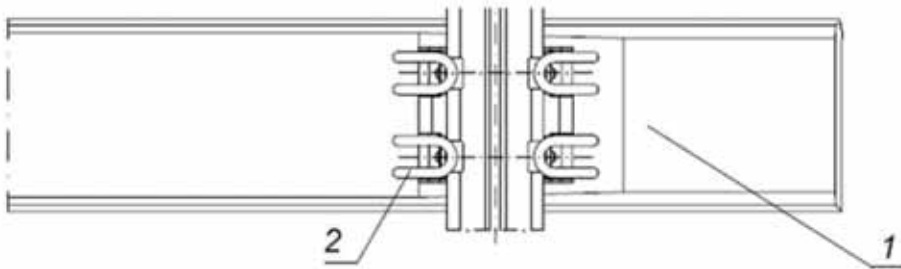
Początki analizy tego typu zjawisk zostały przeprowadzone przez Timoszenkę [6]. Wyniki teoretyczne i doświadczalne wskazujące na zgodność pod względem jakościowym podano na rys. 9. Poza badaniami układów okresowych podanych m.in. w [4] można wymienić badania ogłoszone w [7] o odmiennych podstawach naukowych, prowadzące jednak do podobnego opisu zjawisk i podobnych wyników. Pomiary obciążeń kół kolejowych dokonywane były na tarczach kół. Jest oczywiste, że ośmiokrotny wzrost obciążeń statycznych (pierwiastek z 64, rys. 9b) jest przekazywany na szynę, powodując lokalne uplastycznienia szyn i inicjację powstawania korugacji.



Rys. 10. Układ koło – szyna i szyna – podkład – podsypka

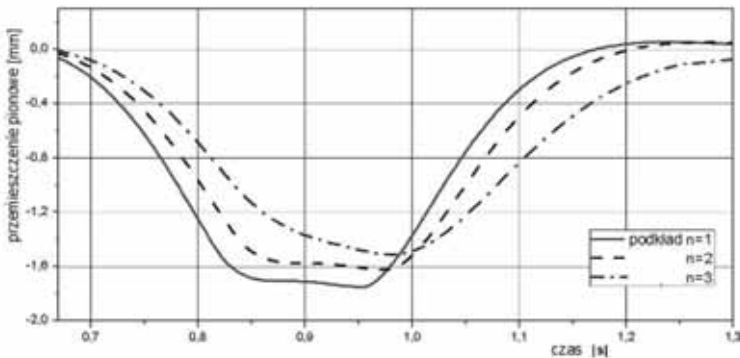
Obciążenie przekazywane na podsypkę nawierzchni klasycznej czy nawierzchnię płytową zależy od rodzaju i podatności węzłów przytwierdzenia, rozkładu podkładów [8], ich wibroizolacji i podatności podsypki. Istotne znaczenie ma również sztywność podkładów, bezwładność względem jego osi oraz wartość momentu

zginającego w węźle przytwierdzenia, np. cechy podkładu przedstawionego na rys. 11.

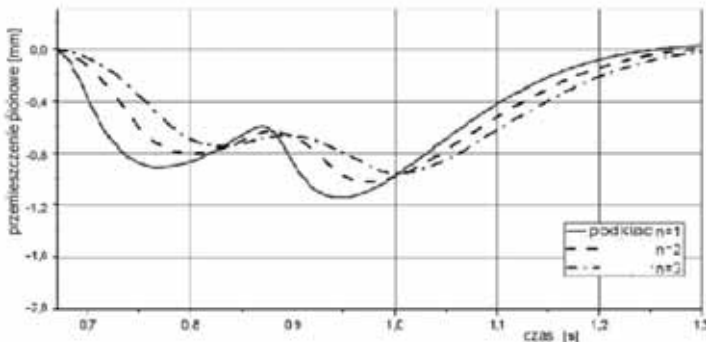


Rys. 11. Podkład o podwyższonej sztywności, masie z podwójnym węzłem przytwierdzenia

Porównanie przemieszczeń pionowych podkładu klasycznego i podkładu z podwójnym węzłem przytwierdzenia przy przejeździe takiego samego pojazdu i takiej samej prędkości (30 km/h) przedstawiono na rysunkach 12 i 13.



Rys. 12. Przemieszczenia pionowe trzech kolejnych podkładów klasycznych w czasie przy prędkości jazdy 30 km/godz.



Rys. 13. Przemieszczenia pionowe trzech kolejnych podkładów o podwójnym węźle przytwierdzenia w czasie przy prędkości jazdy 30 km/godz.



Możemy łatwo zauważyć, że przemieszczenia pionowe bardziej sztywnych podkładów o podwójnym węźle przytwierdzenia są ponad 30% mniejsze i ze względu na większą sztywność obciążenia są bardziej równomiernie rozłożone wzdłuż podkładu. Możemy tu podkreślić, że tor stanowi układ okresowy, który powinien być analizowany jako cała struktura okresowa z uwzględnieniem takich efektów falowych jak pasma przenoszenia i pasma zanikania [4], [5], czy metody podanej w [7]:

$$EI w_{,xxxx} + T w_{,xx} + m w_{,tt} + c w = (F_0 + F_1 \cos \omega t) \delta(x - Vt), \quad (1)$$

gdzie:

$EI$  – sztywność szyn na zginanie,

$w$  – przemieszczenie pionowe,

$T$  – siła wzdłuż współrzędnej  $x$ ,

$m$  – liniowa gęstość masy,

$c$  – sztywność podłoża,

$F_0$  – stała siła,

$F_1$  – siła oscylującą w czasie  $t$  z częstotliwością  $\omega$ ,

$\delta$  – dystrybucja Dirac'a,

$V$  – prędkość ruchu.

Analiza pojedynczego układu ilustrowanego na rysunku 10 nie pozwala uzyskać poprawnych wyników (wartości sił i przemieszczeń), gdyż nie uwzględnia ani efektów falowych w szynach opisanych równaniem (1), ani oddziaływania sąsiednich podkładów. Wpływ wysokoczęstotliwościowych obciążeń związanych z korugacją szyn na podsypkę w przypadku takich podkładów jest jeszcze mniejszy, co ogranicza degradację podsypki. Zagadnienie związku pomiędzy degradacją podsypki a falami poślizgowymi (powstającymi w szynie odciążonej w łuku toru) jest badane doświadczalnie w pracy [9] na liniach kolejowych Austrii.

#### 4. Podsumowanie

Rozważane powyżej zagadnienia dotyczyły wybranych zjawisk dynamicznych, których znajomość pozwala na przedsięwzięcie odpowiednich działań umożliwiających optymalizację projektowania i utrzymania linii kolejowych. Wymienione w niniejszej pracy zagadnienia zostały jedynie zasygnalizowane z podaniem źródłowej literatury, co umożliwi bardziej dokładne ich poznanie oraz głębszą analizę poszczególnych zjawisk. Pierwszym krokiem do badania zjawisk falowych jest analiza fal generowanych przez ruchome źródło w postaci oscylującej siły, a następnie uwzględnienie okresowości struktury toru.

*Badania wspierane częściowo przez NCN w ramach Projektu N N509 5376 40*

## Literatura

- [1] Bogacz R., Kowalska Z., Computer simulation of the interaction between a wheel and a corrugated rail. *Eur. J. Mech. A/Solids* 20, 2001, pp. 673-684.
- [2] Bogacz R., Konowrocki R., On the new effects of wheel-rail interaction. *Archive of Applied Mechanics*, (2012) 82, pp. 1013-1023.
- [3] Bogacz R., Frischmuth K., On some new aspects of contact dynamics with application in railway engineering. *J. Theor. and Appl. Mech.*, 50.1, Warsaw 2012. pp. 119-130.
- [4] Bogacz R., Kamiński A., Krzyżyński T., On influence of pad features on dynamic of railway track, *Engineering Transactions*, 48, 3, 2000, pp. 329-340.
- [5] Bogacz R., Czyczula W., Selected Problems of High Speed Railways. Review of Phenomena and Investigation Results. International Conference "Pojazdy Szybowe", Poznań 2012 pp.10.
- [6] Timoshenko S., Method of analysis of static and dynamical stresses in rail. *Proc. 2nd Int. Congr. Appl. Mech.*, Zurich, 1926, pp. 407-418.
- [7] Jezequel L., Response of periodic systems to moving load. *Journal of Appl. Mech.* 48. (1981), pp. 613-618.
- [8] Bogacz R., Czyczula W., Wybrane zagadnienia dynamiki kolei dużych prędkości przegląd badań dotyczących toru. *Materiały Konferencji Drogi Kolejowe*, Krynica 2013, str.10.
- [9] Bogacz R., Frischmuth K., Meinke P., Stefanidis J., *Zur Stabilität des Spurkranzlaufs*, Innotrans, BahnBau, Berlin 2002, pp.1-20, CD.