



BARTŁOMIEJ DYNIEWICZ¹⁾
KRZYSZTOF SEKUŁA²⁾
TOMASZ DĘBOWSKI³⁾

POMIARY WIELKOŚCI DYNAMICZNYCH W TRANSPORCIE KOLEJOWYM Z WYKORZYSTANIEM CZUJNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE. Prawidłowe funkcjonowanie sieci kolejowej wymaga poznania stanu eksploatowanego toru oraz podtorza. Diagnostowanie sieci kolejowej wymaga m. in. budowy poprawnego modelu numerycznego, symulującego możliwie wiernie badany układ, zachowując przy tym rozsądny czas obliczeń. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentów zrealizowanych na doświadczalnym stanowisku polowym. W pomiarach wykorzystano czujniki piezoelektryczne wykonane w formie płytek o prostokątnym kształcie. Otrzymane wyniki porównano z rezultatami obliczeń numerycznych wykonanych metodą elementów czasoprzestrzennych. Wykazano skuteczność symulacji komputerowych w opisie dynamiki rzeczywistych torów kolejowych.

1. WSTĘP

Ocena stanu torowiska kolejowego i związanych z nim obiektów wymaga przeprowadzenia pomiarów w szynie takich wielkości mechanicznych jak przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie, siła lub ciśnienie. Do tego celu stosujemy odpowiednie

¹⁾ dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

²⁾ mgr inż. – firma CONTEC w Łomiankach

³⁾ mgr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

przetworniki, których sygnał wyjściowy winien liniowo odpowiadać mierzonej wielkości mechanicznej. Nazwa przetwornika często związana jest z nazwą wykorzystywanego do pomiaru zjawiska fizycznego. Najbardziej popularne przetworniki to: ładunkowe (piezoelektryki), opornościowe (tensometry), pojemnościowe, indukcyjne, elektromagnetyczne, ultradźwiękowe i laserowe. Obecnie, ze względu na łatwość montażu, dokładność, małe wymiary i cenę w pomiarach dominują przetworniki oparte na efekcie piezoelektrycznym i tensometry. W badaniach dynamicznych na ogół stosuje się przetworniki piezoelektryczne i niekiedy tensometry, a w pomiarach statycznych głównie tensometry. Obszar zastosowań tych przetworników jest szeroki. Prawie każda złożona konstrukcja mechaniczna na jakimś etapie powstawania (testowanie prototypu, produkcja, diagnostyka) korzystała z tych czujników. Mierzone są typowe struktury mechaniczne m. in.: turbiny, pociągi, tramwaje, pojazdy, samoloty, wahadłowce, rakiety jak i obiekty inżynierii lądowej, takie jak budynki, kominy, wieże, mosty, platformy wiertnicze, zapory i elektrownie wiatrowe.

Motywację podjętych przez autorów działań stanowi konieczność monitorowania obciążeń w transporcie kolejowym. Jest to spowodowane potrzebą rozliczeń finansowych pomiędzy właścicielem infrastruktury kolejowej a przewoźnikami. Ważnym zagadnieniem staje się zatem możliwość skutecznego pomiaru nacisków kontaktowych pomiędzy kołem a szyną. Ma to obecnie nie tylko znaczenie kontrolne i statystyczne, ale również prewencyjne przy ochronie trakcji kolejowej przed ponadnormalnym obciążeniem.

W literaturze możemy znaleźć wiele prac zajmujących się modelowaniem i pomiarami drgań w transporcie kolejowym, m.in. [1 - 4]. Bogaty materiał oraz przegląd literatury dotyczącej dynamiki sieci kolejowej zawiera publikacja Szczęśniaka [5].

Przedmiotem badań w tej pracy jest prosty odcinek toru kolejowego o długości 100 m, po którym porusza się ze stałą prędkością lokomotywa ET22 (rys. 1).



Rys. 1. Lokomotywa ET22 podczas pomiaru
Fig. 1. Train ET22 during the measurement

Jest to lokomotywa z dwoma wózkami trójosiowymi o nacisku osi na szynę równym 20 T. Ponieważ rozpatrywany pojazd szynowy jest zasilany elektrycznie zakładamy niezmiennosc jego masy w czasie ruchu. Na odcinku pomiarowym szyny przytwierdzone są do drewnianych podkładów za pomocą kotew (system przytwierdzenia K). Podkłady posadawione są na podsypce (rys. 2). Przyjmujemy, celem dalszego uproszczenia rozważanego problemu pominięcie wpływu oddziaływań pomiędzy szynami. Zakładamy symetryczność zadania i rozpatrywać będziemy oddziaływania na jedną szynę.



Rys. 2. Fragment toru pomiarowego (widoczny pomiarowy przetwornik laserowy)
Fig. 2. Section of measured track (visible laser measuring transducer)

Układ tor + podtorze modelowany jest jako niekończące się długi belka Bernoulliego-Eulera, umieszczona na dwustopniowym podłożu lepkosprężystym, odpowiadającym odpowiednio przekładkom podszynowym oraz podsypce [6].

Rysunek 3 przedstawia schemat rozważanego przez nas zadania. Przyjęto następujące oznaczenia:

v_m – prędkość przejazdu obciążenia,

m – masa obciążenia,

EI – sztywność giętna,

ρA – masa belki,

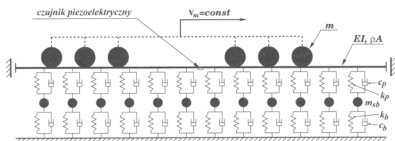
k_p – sztywność przekładki,

c_p – tłumienie przekładki,

k_b – sztywność podsypki,

c_b – tłumienie podsypki,

m_{sb} – masa połowy podkładu powiększona o wpływ bezwładności części podsypki.



Rys. 3. Schemat mechaniczny badanego układu
Fig. 3. Mechanical scheme of the test system

Masę przekładek pomijamy. Weryfikację modelu numerycznego przeprowadzono dzięki pomiarom rzeczywistego obiektu z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych. Pomiaru weryfikowano odczytami laserowych przetworników przemieszczeń.

2. MODEL MATEMATYCZNY

Rozpatrzmy belkę Bernoulliego-Eulera o ograniczonej długości poddaną wpływom ruchomego obciążenia, poruszającego się ze stałą predkością v_m

$$EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \delta(x - v_m t) mg - \delta(x - v_m t) m \frac{d^2 u(v_m t, t)}{dt^2} \quad (1)$$

Powyższe równanie w dalszym etapie pracy zostanie zdyskretyzowane w dziedzinie czasu i przestrzeni. Będziemy rozpatrywać odcinek belki o długości b , który stanowi odpowiednik elementu skończonego.

Zakładamy następujące warunki brzegowe:

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=b} = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^3} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^3} \right|_{x=b} = 0, \quad (2)$$

oraz warunki początkowe:

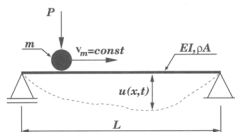
$$u(x,0) = 0, \quad \left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

Równanie ruchu (1) uwzględnia wpływ bezwładności ruchomej masy m

$$\frac{d^2 u(v_m t, t)}{dt^2} = \left. \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \right|_{x=v_m t} + 2v_m \left. \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} \right|_{x=v_m t} + v_m^2 \left. \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=v_m t} \quad (4)$$

Pochodna złożona (4), przedstawiająca przyspieszenie ruchomej masy, zwana jest wzorem Renaudota przy stałej prędkości v_m przejazdu masy. We wzorze tym wyodrębniamy przyspieszenie poprzeczne, przyspieszenie Coriolisa oraz przyspieszenie odśrodkowe. W modelu numerycznym odpowiednikami przekładek i podsypki są pręty odkształcalne osiowo.

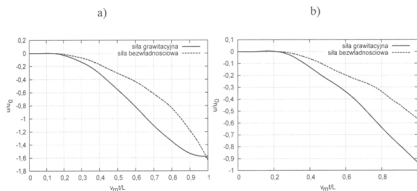
Konieczność uwzględnienia członów związanych z bezwładnością ruchomego obciążenia potwierdzają uzyskane wyniki obliczeń [7] układu przedstawionego na rysunku 4.



Rys. 4. Bełka Eulera pod wpływem ruchomego obciążenia inercyjnego

Fig. 4. Euler beam under a moving inertial load

Rysunek 5 przedstawia wpływ bezwładności ruchomej masy na uzyskane wyniki. u_0 jest przemieszczeniem statycznym w środku bełki Eulera. Wraz ze wzrostem prędkości rosną efekty dynamiczne związane z bezwładnością ruchomej masy. W skrajnych przypadkach brak uwzględnienia bezwładności ruchomej masy prowadzi do błędnego wyniku numerycznego rzędu kilkudziesięciu procent.



Rys. 5. Symulacja drgań bełki Eulera obciążonej ruchomą siłą grawitacyjną i bezwładnościową przy prędkości a) $v_m = 0,3v_w$ i b) $v_m = 0,5v_w$ dla $x = 0,5L$

Fig. 5. Simulation of vibration of the Euler beam under a moving gravitation force and inertial force at a) $v_m = 0,3v_w$ i b) $v_m = 0,5v_w$ for $x = 0,5L$

3. METODY POMIAROWE

Pomiar wielu wielkości mechanicznych konstrukcji realizowany jest poprzez mierzenie odkształcenia sprężystego. Do wyznaczenia jednostkowego odkształcenia opisanego następującym wzorem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (5)$$

gdzie ΔL to względna zmiana długości L spowodowana działającą siłą, stosuje się najczęściej metody tensometryczne z wykorzystaniem tensometrów oporowych, bądź czujniki piezoelektryczne.

Zasada działania tensometrów oporowych jest prosta. Występujące naprężenia powodują zmianę wymiarów geometrycznych cienkich drucików lub folii przewodzącej z jakiej jest zbudowany tensometr, co w rezultacie wywołuje zmianę jego oporności. Odkształcenie ε wyznaczamy z podstawowego równania tensometrii:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_t \varepsilon. \quad (6)$$

R jest początkowym oporem tensometru, ΔR przyrostem oporności, a k_t jest stałą tensometru. W celu kompensacji wpływu temperatury pomiary przeprowadza się najczęściej w układzie mostka Wheatstone'a z zastosowaniem czterech tensometrów, bądź pół-mostka (dwa tensometry). Sygnał wyjściowy z tensometrów wzmacniany jest kilka tysięcy razy.

Czujnik piezoelektryczny (rys. 6), jak sama nazwa wskazuje, działa na zasadzie efektu piezoelektrycznego. Element piezoelektryczny pod wpływem przyłożonej siły F wytwarza na elektrodach ładunek Q zgodnie z zależnością:

$$Q = k_p F, \quad (7)$$

gdzie k_p jest stałą piezoelektryczną. Napięcie na wyjściu przetwornika można obliczyć przekształcając wzór (7) do następującej postaci:

$$U = \frac{Q}{C} = k_p \frac{F}{C}, \quad (8)$$

gdzie C jest sumą pojemności przetwornika, kabli oraz wejściowej pojemności wzmacniacza. Z ostatniego wzoru wynika ważny wniosek. Długie kable między wzmacniaczem napięciowym a przetwornikiem powodują spadek sygnału, będący funkcją ich długości. Zjawisko to można wyeliminować stosując wzmacniacz ładunkowy, który pozwala stosować przewody dowolnej długości.



Rys. 6. Czujniki piezoelektryczne
Fig. 6. Piezoelectric sensors

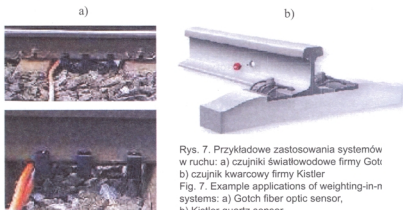
Niżej przedstawiono podstawowe cechy pomiarów odkształceń z użyciem tensometrów oporowych i czujników piezoelektrycznych.

- Najistotniejszą zaletą tensometrów jest możliwość pomiarów zarówno statycznych jak i dynamicznych. Czujniki piezoelektryczne nie przenoszą składowej stałej. Aby uzyskać możliwość przenoszenia sygnału niskiej częstotliwości trzeba stosować dobrej jakości wzmacniacze.
- Wyjątkowo łatwe wzorcowanie tensometrów. W zasadzie przy większości pomiarów nie zachodzi konieczność wzorcowania dynamicznego. Wystarczy znacznie prostsze wzorcowanie statyczne.
- Dobrze naklejone tensometry są zdecydowanie mniej wrażliwe na wahania temperatury w porównaniu do czujników piezoelektrycznych, których czułość zmienia się wraz z temperaturą.
- Napięcie wyjściowe z tensometrów jest niewielkie (mierzone w mikrowoltach). Z tego względu przewody muszą być starannie ekranowane od zakłóceń. Odległość do wzmacniacza nie może przekraczać kilku metrów, co przy kilku rozrzuconych punktach pomiarowych wymusza zastosowanie paru oddzielnych wzmacniaczy tensometrycznych. Napięcie na wyjściu czujników piezoelektrycznych jest duże (dochodzi do woltów). Używając wzmacniaczy ładunkowych można przesyłać sygnał na duże odległości.
- Montaż czujników piezoelektrycznych jest szybszy i wymaga mniejszej precyzji.
- Górne pasmo przenoszenia przetworników piezoelektrycznych jest znacznie wyższe – maksymalna częstotliwość pracy sięga dziesiątek kiloherców, co pozwala rejestrować sygnały przy których tensometry są za wolne.

4. IDENTYFIKACJA OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

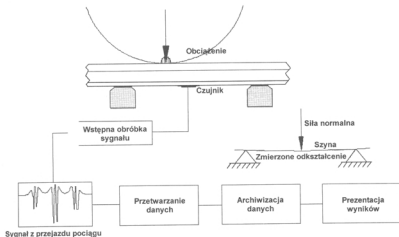
Możliwe są dwa podejścia mające na celu określenie obciążeń dynamicznych w transporcie kolejowym. Jednym z nich jest wyposażenie wagonów w czujniki m.in. [8, 9]. Drugi polega na przeprowadzeniu pomiarów z wykorzystaniem przetworników, które umiejscowione są na zewnątrz. Pierwszy sposób jest rzadko stosowany i wydaje się mieć mniejsze znaczenie praktyczne. Z tego względu drugie podejście zostanie przedstawione szerzej w dalszej części pracy. Jedną z pierwszych metod stosowanych do

oszacowania masy przejeżdżającego składu kolejowego było wyposażenie konstrukcji mostowych w czujniki. Najczęściej stosowane do tego celu były tensometry oporowe. Ta metoda jest jednak z powodzeniem zastępowana przez światłowodowe techniki pomiarowe. Szczególnie jest to zauważalne w przypadku nowych konstrukcji, gdzie przetworniki umieszczane są w konstrukcji już w czasie budowy obiektu [10]. Obecnie dostępnych jest kilka rozwiązań komercyjnych, które stosowane są do pomiaru obciążenia torowiska od przejeżdżającego pociągu. Należą one do systemów typu WIM (ang. *Weigh-In-Motion*). Jedną z takich technik opiera się na pomiarze siły. Rozwiązanie to wymaga specjalnego przygotowania toru i posadowienia go zazwyczaj na betonowym fundamencie do zapewnienia bazy przetworników. Rozwiązanie to jest kosztowne ale zapewnia dużą dokładność identyfikowanej masy. Jest to podstawową zaletą prezentowanego podejścia. Poważnym ograniczeniem i wadą metody jest konieczność utrzymania limitu prędkości poruszającego się składu w trakcie pomiaru [11]. W praktyce jest to ok. 5 km/h. Aby pozbyć się ograniczeń prędkości podczas ważenia, zaproponowane zostały pośrednie metody identyfikowania obciążeń oparte na pomiarze odkształceń szyny, wywołanych przejazdem po niej pociągu. Klasyfikacja systemów ważenia w ruchu, dedykowanych do transportu kolejowego, może być przeprowadzona na podstawie typu użytych czujników oraz ich lokalizacji. Jedne z nich wykorzystują tensometry oporowe umiejscowione na wysokości osi obojętnej szyny lub na jej stopce. Możliwe jest również podobne zastosowanie czujników światłowodowych, mocowanych do bocznej części szyny, lub za pomocą specjalnych obejm mocowanych do stopki szyny (rys. 7). Znane są również techniki inwazyjne w których przetworniki umieszcza się w otworze wykonanym z boku szyny. Rozwiązanie to wykorzystuje czujniki kwarcowe o cylindrycznym kształcie (rys. 7). Obecnie oferowane systemy komercyjne charakteryzują się wysoką ceną. Utrudnia to ich powszechne zastosowanie. Zaprojektowanie i zbudowanie układu mającego zbliżone parametry pomiarowe do konkurencyjnych rozwiązań oraz znacznie tańszego w porównaniu z oferowanymi na rynku, stanowi jedną z podstawowych założeń podjętych działań.



Rys. 7. Przykładowe zastosowania systemów w ruchu: a) czujniki światłowodowe firmy Gotch b) czujnik kwarcowy firmy Kistler
Fig. 7. Example applications of weighting-in-n systems: a) Gotch fiber optic sensor, b) Kistler quartz sensor

Proponowane podejście wykorzystuje nieinwazyjną technikę pomiaru odkształceń szyny kolejowej wywołanych przejazdem pociągu. Konstrukcja urządzenia wykorzystuje czujniki piezoelektryczne, które naklejane są na spodnią część szyny w środku jej długości pomiędzy podkładami. Podstawowe komponenty systemu pomiarowego przedstawiano schematycznie na rysunku 8. Wygenerowany z czujnika piezoelektrycznego sygnał elektryczny, proporcjonalny do odkształcenia, poddany jest wstępnej obróbce, polegającej na wzmocnieniu, filtrowaniu i próbkowaniu wykorzystując przetwornik analogowo-cyfrowy. Celem tych operacji jest uzyskanie danych pomiarowych w formie optymalnej ze względu na ich transmisję. W celu poprawienia dokładności pomiarów i zwiększenia niezawodności działania samego urządzenia zastosowano nadliczbowe czujniki. Ważne jest by czujniki mocowane były w sposób niewidoczny z zewnątrz. Ma to duże znaczenie ze względu na potencjalne ich zniszczenie. Cechą charakterystyczną proponowanego rozwiązania jest brak konieczności dodatkowego specjalnego przygotowywania podtorza oraz podkładów kolejowych.



Rys. 8. Ogólny schemat układu pomiarowego
Fig. 8. General scheme of the measuring system

5. MODEL NUMERYCZNY

W obliczeniach numerycznych wykorzystamy prędkościowy wariant metody elementów czasoprzestrzennych [12 - 14]. Szynę kolejową dyskretyzujemy elementami belki Bernoulliego-Eulera. Rozpatrzmy równanie ruchu belki w obszarze czasoprzestrzennym $\Omega = \{(x, t): 0 \leq x \leq b, 0 \leq t \leq h\}$. Równanie mocy wirtualnej otrzymujemy mnożąc równanie ruchu przez prędkość wirtualną $v^*(x, t)$. Całkując całość zarówno względem czasu jak i przestrzeni otrzymujemy równanie pracy wirtualnej. Całkowitą pracę wirtualną w obszarze Ω przedstawia wzór:

$$\int_0^b \int_0^b v^*(x, t) \left(EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \delta(x - v_m t) mg + \delta(x - v_m t) m \frac{d^2 u(v_m t, t)}{dt^2} \right) dx dt. \quad (9)$$

Przyjmujemy rozkład prędkości rzeczywistej $v = \partial u / \partial t$ za pomocą wielomianu 3-go stopnia w przestrzeni x , z rozkładem liniowym w czasie t

$$v(x, t) = \left(1 - \frac{t}{h} \right) [N_1(x)v_1 + N_2(x)\dot{\phi}_1 + N_3(x)v_2 + N_4(x)\dot{\phi}_2] + \frac{t}{h} [N_1(x)v_3 + N_2(x)\dot{\phi}_3 + N_3(x)v_4 + N_4(x)\dot{\phi}_4], \quad (10)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} N_1(x) &= 1 - 3\frac{x^2}{b^2} + 2\frac{x^3}{b^3}, \\ N_2(x) &= x - 2\frac{x^2}{b} + \frac{x^3}{b^2}, \\ N_3(x) &= 3\frac{x^2}{b^2} - 2\frac{x^3}{b^3}, \\ N_4(x) &= -\frac{x^2}{b} + \frac{x^3}{b^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Przemieszczenia obliczamy całkując prędkości (10), pamiętając o przemieszczeniach początkowych $u(x, 0)$

$$u(x, t) = u(x, 0) + \int_0^t v(x, \tau) d\tau. \quad (12)$$

Właściwy dobór funkcji wirtualnych v^* ma podstawowe znaczenie w metodzie elementów czasoprzestrzennych. Różne funkcje wirtualne zastosowane w obliczeniach, dają w wyniku lepsze lub gorsze poziomy zbieżności i stabilności [15]. W tym przypadku przyjęto kapeluszkową funkcję prędkości wirtualnych, o stałej wartości w czasie.

Ostateczną formę zdyskretyzowanego równania ruchu, zakładającego równowagę sil na brzegach elementu w zbiorze Ω , przedstawiono w postaci macierzowej:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{C} + \mathbf{K}) \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{v}_{i+1} \end{Bmatrix} + \mathbf{e} = \mathbf{f}. \quad (13)$$

\mathbf{M} , \mathbf{K} i \mathbf{C} są czasoprzestrzennymi macierzami bezwładności, sztywności i wiskotycznego tłumienia. Wektor \mathbf{v} zawiera zarówno prędkości węzłowe \mathbf{v}_i w początkowym czasie $t = t_i$ oraz \mathbf{v}_{i+1} w końcowym czasie $t = t_i + h$. h jest założonym krokiem czasowym. \mathbf{f} jest wektorem obciążeń zewnętrznych. Wektor prędkości \mathbf{v}_{i+1} jest jedynym

niezanym wektorem w powyższym równaniu. Możemy rozwiązywać je krok po kroku. Ostatecznie musimy obliczyć przemieszczenia \mathbf{q}_{i+1} . W tym celu używamy następującej formuły:

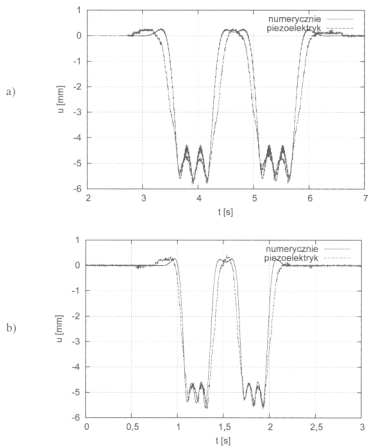
$$\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{q}_i + h [\beta \mathbf{v}_i + (1 - \beta) \mathbf{v}_{i+1}] . \quad (14)$$

Stabilne rozwiązania uzyskujemy przy $\beta \in \langle 0,5; 1,0 \rangle$.

Metoda elementów czasoprzestrzennych charakteryzuje się sposobem dyskretyzacji różniczkowego równania ruchu. W metodzie tej dyskretyzujemy rozpatrywane równanie jednocześnie względem zmiennej przestrzennej x jak i czasu t . Możemy zatem postulować równowagę pewnych wielkości fizycznych, np. energii, w przedziale czasu, a nie jedynie w wybranych chwilach. Rozwiązanie problemu sprowadza się do numerycznego rozwiązania układu równań algebraicznych (13). Takie podejście zakłada ciągły rozkład charakterystycznych funkcji prędkości w całym obszarze czasoprzestrzennym Ω , w którym konstrukcja jest rozpatrywana. Metoda elementów czasoprzestrzennych jest uogólnieniem metody elementów skończonych [14].

6. WYNIKI I WNIOSKI

Porównanie wyników przemieszczeń uzyskanych z pomiarów czujnikami piezoelektrycznymi oraz z obliczeń numerycznych prezentuje rysunek 9. Obserwujemy dużą zgodność z rzeczywistością zastosowanego stosunkowo prostego modelu numerycznego ruchomego obciążenia. Wykonanie obliczeń komputerowych ma znaczący wpływ na obniżenie kosztów przygotowania projektu i wstępnych testów urządzenia identyfikującego obciążenia w ruchu kolejowym, w porównaniu z badaniami stanowiskowymi. Czujniki piezoelektryczne potwierdziły swą przydatność w pomiarach wielkości dynamicznych w transporcie kolejowym. Do istotnych zalet czujników piezoelektrycznych można zaliczyć łatwiejszy sposób montażu i mniejsze wymagania dotyczące jakości powierzchni, w stosunku do czujników tensometrycznych. Jednak ich główną zaletą jest możliwość przesyłania zarejestrowanych przez nie sygnałów na duże odległości, dzięki zastosowaniu wzmacniaczy ładunkowych. W przypadku czujników tensometrycznych jest to bardzo utrudnione.



Rys. 9. Porównanie wyników symulacji drgań za pomocą metody elementów czasoprzestrzennych oraz pomiarów z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych, przy prędkości: a) $v_m = 20$ km/h, b) $v_m = 60$ km/h

Fig. 9. Comparison of simulation results of vibration using the time-space finite elements method and measurement using piezoelectric sensors at the speed: a) $v_m = 20$ km/h, b) $v_m = 60$ km/h

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Bajer C.I., Dyniewicz B.* Numerical modelling of structure vibrations under inertial moving load. Arch. Appl. Mech., **79**, 6-7/2009, 499 - 508
- [2] *Johansson A., Nielsen J.C.O.*: Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. Proc. Inst. Mech. Eng., **217**, 2003, 135 - 146
- [3] *Zhai W., Cai Z.*: Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. Comput. and Struct., **63**, 5, 1997, 987 - 997
- [4] *Koro K., Abe K., Ishida M., Suzuki T.*: Timoshenko beam finite element for vehicle-track vibration analysis and its application to jointed railway track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of rail and rapid transit, **218**, 2, 2004, 159 - 172
- [5] *Szcześniak W.*: Statyka, dynamika i stateczność nawierzchni i podtorza kolejowego. Przegląd podstawowych pozycji literatury. Prace Naukowe, Budownictwo, Politechnika Warszawska, **129**, 1995, 5 - 182
- [6] *Kerr A.D.*: Elastic and viscoelastic foundation models. J. Appl. Mech., ASME, **31**, 1964, 491 - 498
- [7] *Dyniewicz B., Bajer C.I.*: The influence of inertia in moving load problems. W: Szcześniak W., ed., Theoretical Foundations in Civil Engineering, OWPW, Warsaw 2009, 73 - 80
- [8] *Uhl T.*: The inverse identification problem and its technical application. Arch. Appl. Mech., **77**, 2007, 325 - 337
- [9] *Kanehara H., Fujioka T.*: Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles. Wear, **253**, 1, 2002, 275 - 283
- [10] *Liljencrantz A., Karoumi R., Olofsson P.*: Implementing bridge weigh-in-motion for railway traffic. Comput. and Struct., **85**, 1-2/2007, 80 - 88
- [11] *Niedźwiecki M., Wasilewski A.*: New algorithms for the dynamic weighing of freight trains. Control Eng. Practice, **5**, 5, 1997, 603 - 618
- [12] *Bajer C.I.*: Space-time finite element formulation for the dynamical evolutionary process. Appl. Math. and Comp. Sci., **3**, 2, 1993, 251 - 268
- [13] *Kączkowski Z.*: The method of finite space-time elements in dynamics of structures. J. Tech. Phys., **16**, 1, 1975, 69 - 84
- [14] *Bajer C.I.*: Metoda elementów czasoprzestrzennych w obliczeniach dynamiki konstrukcji. Biblioteka Mechaniki Stosowanej, IPPT PAN, Warszawa 2009
- [15] *Bajer C.I., Dyniewicz B.*: Virtual functions of the space-time finite element method in moving mass problems. Comput. and Struct., **87**, 2009, 444 - 455

INFORMACJE DODATKOWE

Praca została wykonana przy finansowym wsparciu projektów: „System monitorowania i diagnostyki konstrukcji o wysokim poziomie ryzyka awarii SHMCS” nr R03 015 02 oraz „Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i ocena ich żywotności MONIT” nr POIG.0101.02-00-013/08-00.

DYNAMIC MEASUREMENTS OF THE RAILWAY TRANSPORTATION USING PIEZOELECTRIC SENSORS

Abstract

For proper operation of a railway system, identification of the track parameters is necessary. In order to perform the monitoring, a numerical model of the railway system is required. The model should be as accurate as possible but it should also ensure moderate numerical costs of the computations. The paper presents experimental results taken in situ. The measurements were performed using piezoelectric sensors of a rectangular plate shape. The experimental measurements have been compared to the results of numerical simulations obtained using the method of space-time finite elements method. The effectiveness of the numerical simulation in modeling of the track dynamics has been proved.