

Modelowanie interakcji pojazd-most w warunkach deformacji niwelety drogi

Modeling the vehicle-bridge interaction in the conditions of road level deformation



Mieszko Kuźawa

Dr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

mieszko.kuzawa@pwr.edu.pl

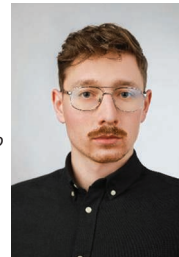


Aleksander Mróz

Mgr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

aleksander.mroz@pwr.edu.pl



Maksymilian Kliński

Mgr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

maksymilian.klinski@pwr.edu.pl



Jan Bien

Prof. dr hab. inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

jan.bien@pwr.edu.pl



Józef Rabięga

Dr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

jozef.rabiega@pwr.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę i wyniki symulacji numerycznych wzajemnych oddziaływań dynamicznych pomiędzy pojazdami a konstrukcją mostu, która ma uszkodzenia w postaci nadmiernych trwałych ugięć przęseł. Analizy symulacyjne przeprowadzono na przykładzie rzeczywistego autostradowego obiektu mostowego, na którym stwierdzono występowanie trwałych deformacji niwelety jezdni. Jako obciążenie ruchome zamodelowano typowy 5-osiowy samochód ciężarowy o całkowitej masie 40 t. W trakcie analiz główną uwagę zwrócono na wartości pionowych przemieszczeń i przyspieszeń drgań przęseł mostu generowanych przez pojazdy ciężarowe w funkcji intensywności trwałych ugięć konstrukcji przęseł oraz prędkości pojazdu.

Słowa kluczowe: Analiza dynamiczna mostów; Drgania mostów; Metoda Elementów Skończonych; Deformacje konstrukcji

Abstract: The paper presents a method and results of numerical simulations of dynamic interactions between vehicles and the bridge structure, which has defects in the form of excessive permanent deflections of their spans. The simulation analyzes were carried out on the example of a real motorway bridge, on which the presence of such defects was found. A typical 5-axle truck with a total weight of 40 tons was modeled as a moving load. During the analyzes, the main attention was paid to the values of vertical displacements and accelerations of vibrations of the bridge spans generated by heavy vehicles as a function of the intensity of permanent deflections of the structure and the vehicles speed.

Keywords: Dynamic analysis of bridges; Bridge vibrations; Finite Element Method; Structure deformations

Wstęp

Trwałe deformacje niwelety drogi na obiektach mostowych są zjawiskiem stosunkowo często występującym w trakcie użytkowania drogowej sieci transportowej. Deformacje takie mogą powstawać z różnych powodów, jak na przykład: niekontrolowane osiadanie rusztowań w trakcie budowy obiektu, niezgodne z projektem ugięcia konstrukcji związane ze zjawiskami reologicznymi lub nieprawidłowym sprzężeniem, trwałe ugięcia spo-

wodowane przeciążeniami obiektu w wyniku przewozów ponadnormatywnych lub kolizji.

Trwałe zmiany kształtu konstrukcji mostowej, najczęściej w postaci ugięć konstrukcji przęseł, powodują zmiany kształtu niwelety drogi, a w efekcie zmiany warunków ruchu pojazdów. Zaburzenia trasy ruchu pojazdów powodują z reguły wzrost efektów dynamicznych związanych z interakcją pojazdów oraz konstrukcji mostowej. Może to prowadzić do zwiększenia wartości obciążeń eksploatacyjnych,

obniżenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji, a także pogorszenia warunków użytkowania obiektów z powodu zwiększenia amplitud przemieszczeń oraz wartości przyspieszeń drgań konstrukcji przęseł. Kwestia ta jest szczególnie istotna w odniesieniu do obiektów mostowych usytuowanych w ciągach autostrad i dróg szybkiego ruchu, gdzie mamy do czynienia ze znaczną liczbą ciężkich pojazdów oraz z dużymi prędkościami ruchu.

Zjawisko wpływu trwałych ugięć

prześleń skutkujących bezpośrednio deformacją niwelety jedni na warunki eksploatacji infrastruktury mostowej nie jest ujęte w obecnie stosowanych zaleceniach dotyczących analizy istniejących konstrukcji mostowych (patrz np. [1]-[4]).

W związku z tym przeprowadzono numeryczną analizę symulacyjną wzajemnych oddziaływań dynamicznych pojazdów oraz konstrukcji mostowej z uszkodzeniami w postaci nadmiernych deformacji. Wyniki wykonanych analiz oraz płynące z nich wnioski przedstawiono w niniejszym artykule.

Metodyka numerycznych analiz symulacyjnych

Kompleksowy obraz teoretycznej, dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowych na obciążenia ruchome można otrzymać za pomocą analizy czasowej drgań wymuszonych [5]–[9]. Wymaga to sformułowania modelu matematycznego, który stanowią macierzowe równania różniczkowe, tzw. równania ruchu, sformułowane w przemieszczeniach i jego pochodnych po czasie dla punktów węzłowych modelu. Sformułowanie równań ruchu, nawet dla układów o kilku stopniach swobody dynamicznej, jest wymagającym zadaniem. Analitycznie można z reguły otrzymać rozwiązania tylko dla bardzo podstawowych zagadnień. W praktyce, niezbędnym krokiem przy analizie dynamicznej złożonych układów jest opracowanie i analiza modelu numerycznego MES.

W analizie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji mostowych na obciążenia i oddziaływania z reguły stosuje się metody całkowania niejawnego (ang. *dynamic implicit analysis*), w których wyznaczane wartości w kroku $i+1$ zależą zarówno od wartości wielkości w kroku i , jak również w kroku $i-1$. Metody te są w ogólnym przypadku (zagadnienia nieliniowe) metodami iteracyjnymi. Do grupy metod całkowania niejawnego należy metoda Newmarka [10], którą zastosowano w niniejszej pracy. Jej podstawowe założenia teoretyczne krótko omówiono poniżej.

W metodach całkowania niejawnego czas dzielony jest na dyskretne chwile czasowe $t_i \in \{t_1, \dots, t_n\}$, a następnie dokonywana jest dyskretyzacja równania ruchu węzłów modelu, tj. równanie ruchu układu dynamicznego przekształca się do następującej postaci:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})+\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1})+\mathbf{K}\mathbf{u}(t_{i+1})=\mathbf{p}(t_{i+1}) \quad (3)$$

gdzie:

$\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych przyspieszeń drgań węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$.

$\mathbf{\ddot{u}}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych prędkości drgań węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$,

$\mathbf{u}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych przemieszczeń węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$,

$\mathbf{p}(t_{i+1})$ – wektor węzłowych zastępczych obciążeń zewnętrznych, tj. obciążeń równoważnych układu przyłożonych w węzłach (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym i -tym.

W kolejnych krokach czasowych $i+1$ analizy poszukuje się przybliżonego rozwiązania układu równań (1) w funkcji dyskretnej zmiennej czasu na podstawie wielkości obliczonych dla poprzedniej chwili t_i , z uwzględnieniem warunków początkowych. Aproksymuje się zmienność przemieszczeń prędkości i przyspieszeń drgań w poszczególnych podprzedziałach $[t_i, t_{i+1}]$, gdzie $t_{i+1} = t_i + \Delta t$.

Długość kroku całkowania Δt jest
kluczowym parametrem wpływają-

cym na dokładność otrzymanego rozwiązania. Wartość tego parametru powinna być ułamkiem okresu drgań własnych o wyższych numerach (częstotliwościach). W prezentowanych analizach założono krok czasowy: $\Delta t = 0.001$ s, aby spełnić warunek $\Delta t < 0.1/f_{\max}$.

Wartości prędkości oraz przemieszeń drgań na końcu kroku czasowego oblicza się na podstawie znanych na początku kroku czasowego wartości $\dot{\mathbf{u}}(t)$ i $\mathbf{u}(t)$ ze wzorów:

$$\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) = \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \int_0^{\Delta t} \ddot{\mathbf{u}}(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\mathbf{u}(t_{i+1}) = \mathbf{u}(t_i) + \int_0^{\Delta t} \dot{\mathbf{u}}(\tau) d\tau \quad (5)$$

w których τ jest lokalną zmienną czasową w poszczególnych podprzedziałach czasu $[t_y, t_{i+1}]$.

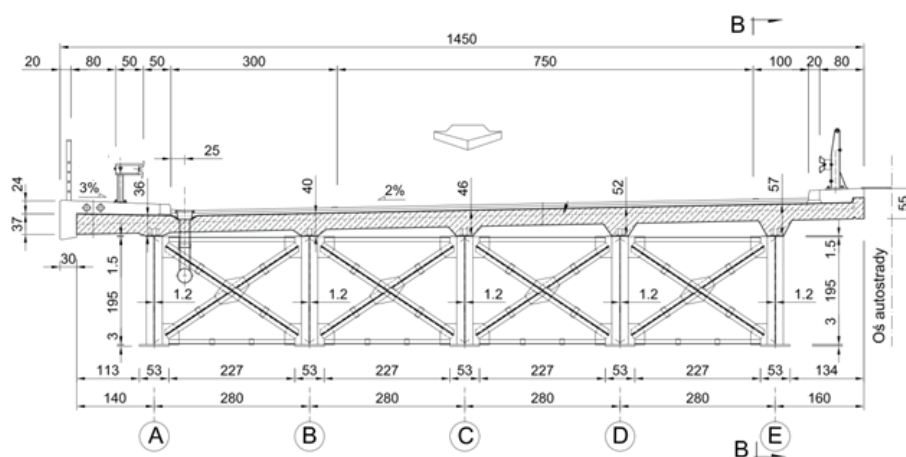
Rozwiązanie równań (4) i (5) wymaga określenia arbitralnego charakteru zmian przyspieszenia $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ w trakcie pojedynczego kroku czasowego. W analizach przyjęto stałą wartość przyspieszeń w podprzedziałach $[t_r, t_{r+1}]$. Jest to tzw. metoda średniej wartości przyspieszenia (ang. *average acceleration method*), w której zmiany przyspieszeń drgań w trakcie kroku czasowego można sformułować następująco:

$$\ddot{\mathbf{u}}(\tau) = \ddot{\mathbf{u}}(t) + \tau/\Delta t [\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) - \ddot{\mathbf{u}}(t)] \quad (6)$$

W metodzie Newmarka dla prędkości i przemieszczenia na końcu przedziału czasu Δt muszą zostać spełnione następujące warunki:

$$\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) = \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \Delta t[(1-\delta)\ddot{\mathbf{u}}(t_i) + \delta\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})] \quad (7a)$$

$$\mathbf{u}(t_{i+1}) = \mathbf{u}(t_i) + \Delta t \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \Delta t^2 [(1/2 - \beta)$$



1. Podstawowe wymiary konstrukcji pojedynczego przęsła mostu – przekrój poprzeczny

$$\ddot{u}(t) + \beta \ddot{u}(t_{i+1})] \quad (7b)$$

W prezentowanej analizie przyjęto wartości parametrów stosowane w standardowej metodzie Newmarka, tj. $\delta=0.5$, $\beta=0.25(0.5+\delta)^2$.

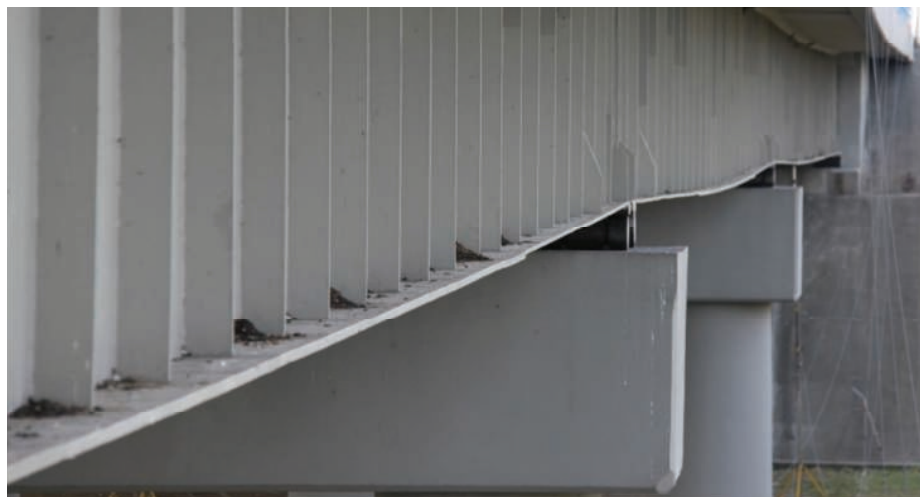
Model obliczeniowy konstrukcji mostowej

Analizy symulacyjne przeprowadzono na przykładzie rzeczywistego autostradowego obiektu mostowego, na którym stwierdzono występowanie trwałych deformacji niwelety jedni. Rozpatrywany obiekt posiada dwie rozdzielone wieloprzęsłowe konstrukcje przęseł, każda pod jedną jezdnią autostrady. Schemat statyczny dźwigarów głównych mostu jest belkowy, 7-przęsłowy, z pozornym uciąganiem konstrukcji w przekrojach podporowych, przy użyciu cienkiej płyty żelbetowej. Przęsła zaprojektowano jako zespolone ze stalowych dźwigarów blachownicowych ze stali gatunku 18G2A oraz żelbetowej płyty pomostowej (rys. 1) z betonu klasy B30. Konstrukcja zespolona wykazuje niezgodne z projektem nadmierne, trwałe ugięcia, wynoszące około 10 cm w środku rozpiętości każdego przęsła (rys. 2).

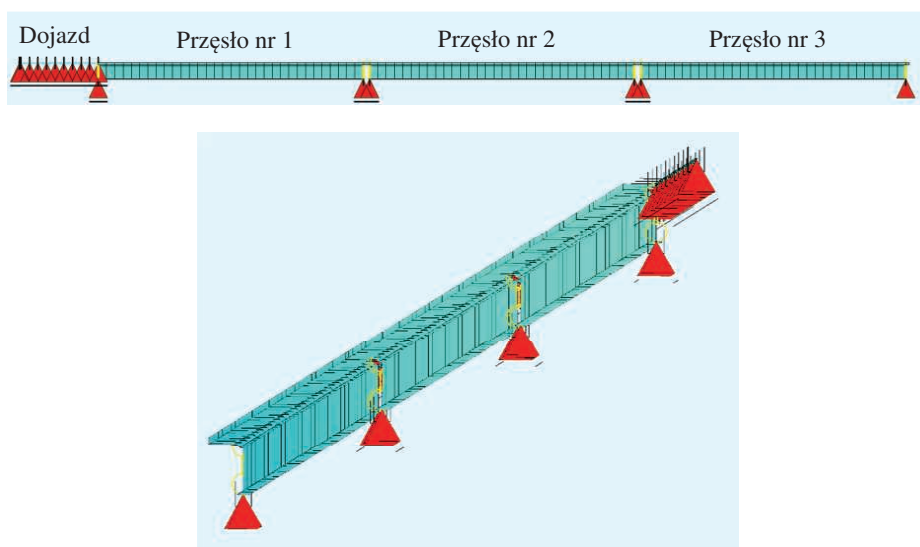
Na potrzeby analiz prowadzonych Metodą Elementów Skończonych (MES) konstrukcję przęseł mostu odwzorowano w postaci modelu klasy (e1,p2) złożonego z elementów jednowymiarowych usytuowanych w przestrzeni dwuwymiarowej (rys. 3). Model ten reprezentuje pojedynczy dźwigar wydzielony z trzech kolejnych skrajnych przęseł analizowanej konstrukcji.

Na potrzeby dynamicznych analiz symulacyjnych interakcji pojazd-konstrukcja mostowa przeprowadzono analizy porównawcze przy wykorzystaniu dwóch typów modeli:

- model bez uszkodzeń o idealnej geometrii przęseł – zgodnej z zaprojektowaną niweletą,
- model z uszkodzeniami w postaci trwałych ugięć przęseł mostu o maksymalnych wartościach do



2. Trwałe ugięcia dźwigarów głównych przęseł



3. Model numeryczny konstrukcji opracowany w programie SOFiSTiK – widok z boku z podziałem na przęsła oraz widok aksonometryczny

150 mm, które modelowano jako zastępcze imperfekcje geometryczne w odniesieniu do pierwotnej, idealnej geometrii modelu MES.

Model obciążeń ruchomych

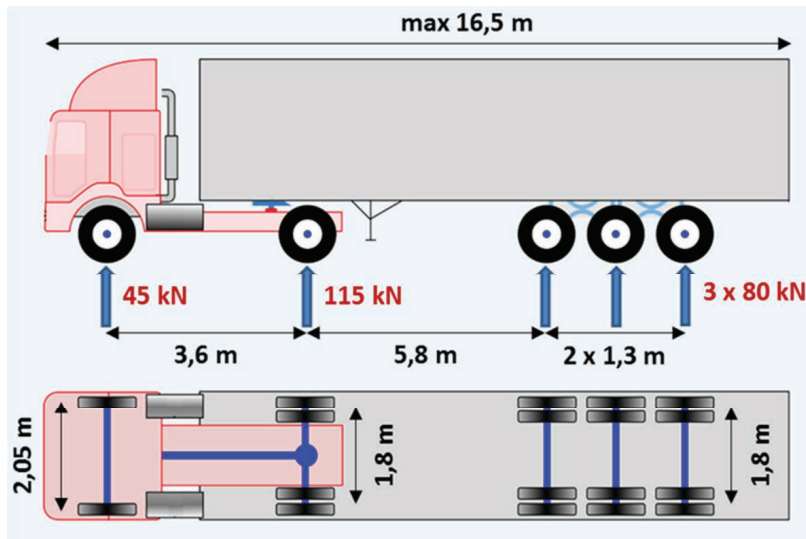
Analiza pracy konstrukcji pod obciążeniem modelami pojazdów rzeczywistych wymaga przyjęcia nie tylko efektywnego modelu numerycznego konstrukcji, ale również skutecznego odwzorowania poruszającego się pojazdu [11]-[12]. W prezentowanych analizach symulacyjnych jako obciążenie ruchome zamodelowano typowy 5-osiowy samochód ciężarowy o całkowitej masie 40 t (rys. 4).

W prezentowanych analizach zastosowano uproszczony model pojazdu, w którym obciążenie pojazdem spro-

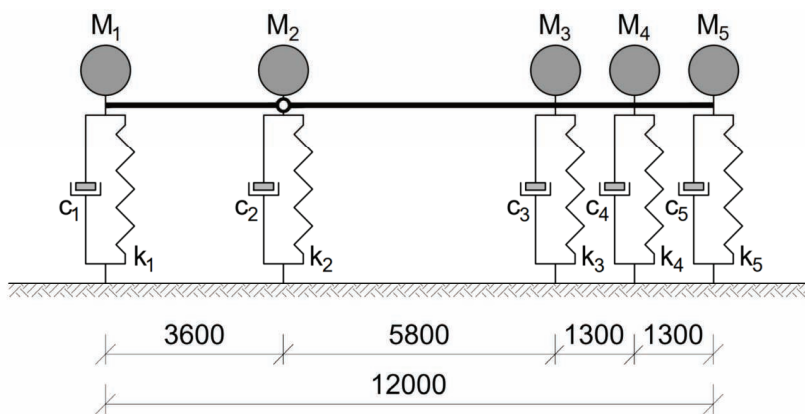
wadzano do pięciu mas oraz pięciu oscylatorów lepko-sprężystych odpowiadających poszczególnym osiom zawieszenia, połączonych ze sobą prętem o znacznej sztywności, z przegubem w miejscu masy M2 – patrz rys. 5.

W widmie częstotliwościowym oddziaływań pojazdu uwzględniono podstawowe częstotliwości drgań własnych nadwozia o wartości 2,3 Hz, które są rezultatem drgań tzw. masy resorowanej. Przyjęta wartość jest często spotykana w wielu popularnych typach ciężkich pojazdów drogowych. Podstawowe parametry modelu pojazdu zestawiono w Tab. 1.

Analizy symulacyjne przeprowadzono dla prędkości ruchu pojazdów od 10 m/s (36 km/h) do 30 m/s (108 km/h).



4. Typowy pojazd 5-osiowy o masie 40 ton - rozstaw i obciążenia osi pojazdu



5. Schemat zawieszenia zamodelowany jako oscylatory lepko sprężyste połączone prętem o sztywności dążącej do nieskończoności

Wyniki analiz parametrycznych

Przeprowadzono kompleksową analizę parametryczną wzajemnego oddziaływania dynamicznego przyjętego modelu pojazdu ciężarowego o masie 40 ton oraz rozpatrywanego typu konstrukcji mostowej z uszkodzeniami w postaci nadmiernych deformacji. W kolejnych symulacjach przejazdu pojazdu po obiekcie badano wpływ zmiany jednego identyfikatora modelu (przy ustalonych wartościach pozostałych parametrów) na zachowanie się konstrukcji.

W trakcie analiz główną uwagę zwrócono na wartości pionowych przemieszczeń, przyspieszeń drgań konstrukcji prześle generowanych przez pojazdy ciężarowe w dźwigarach głównych w funkcji intensywności trwałych ugięć konstrukcji prze-

seł. Wybrane wyniki obliczeń zmian wielkości fizycznych w funkcji czasu wywołane przejazdem 5-osiowego pojazdu o masie 40 ton z prędkością 30 m/s (108 km/h) pokazano na rys. 6 oraz rys. 7:

- na rys. 6 przedstawiono zmiany przemieszczeń przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości prześła nr 3 modelu konstrukcji (patrz rys. 3) przy różnych wartościach trwałych ugięć prześleł,
- na rys. 7 zaprezentowano wpływ różnych wartości trwałych ugięć prześleł na zmiany przyspieszeń drgań w środku rozpiętości prześła nr 3 modelu konstrukcji.

Wpływ prędkości ruchu pojazdu przy trwałych deformacjach niwelety o maksymalnej wartości 100 mm na maksymalne wartości pionowych

Tab. 1. Zestawienie parametrów numerycznego modelu pojazdu

Parametr modelu	Wartość parametru
Podstawowa częstotliwość drgań własnych	2,3 Hz
Liczba węzłowych przemieszczeń uogólnionych	5
Masy skupione w miejscu osi	$M_1=1.265$ t
	$M_2=2.415$ t
	$M_{3-5}=1.840$ t
Sztywność zawieszenia	$k_1=263.9$ kN/m
	$k_2=503.8$ kN/m
	$k_{3-5}=383.9$ kN/m
Tłumienie zawieszenia	$c_1=3.654$ kN/(m-sek)
	$c_2=6.976$ kN/(m-sek)
	$c_{3-5}=5.315$ kN/(m-sek)

przemieszczeń dynamicznych przedstawiono na rys. 8, natomiast wpływ na maksymalne przyspieszenia drgań – na rys. 9.

Wpływ poziomu trwałych ugięć prześleł na zwiększenie wartości współczynnika przeciążeń dynamicznych, wyznaczonego jako stosunek przemieszczeń dynamicznych do statycznych, przy prędkości przejazdu wynoszącej 25 m/s zaprezentowano na rys. 10.

Analiza wyników

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych można sformułować następujące wnioski:

- Na odpowiedź dynamiczną konstrukcji, zarówno w kontekście przemieszczeń, jak i przyspieszeń drgań znaczący wpływ mają takie czynniki, jak prędkość przejazdu pojazdu po obiekcie oraz wartości trwałych ugięć konstrukcji prześleł. Wzrost wartości wymienionych parametrów skutkuje istotnym zwiększeniem efektów dynamicznych generowanych przez układ pojazd-konstrukcja obiektu.
- Z reguły ekstremalne efekty dynamiczne w konstrukcji (w aspekcie ugięć i przyspieszeń drgań dźwigarów głównych prześleł) otrzymywano w przekroju zlokalizowanym w środku rozpiętości prześła nr 3 podczas przejazdu modeli po-

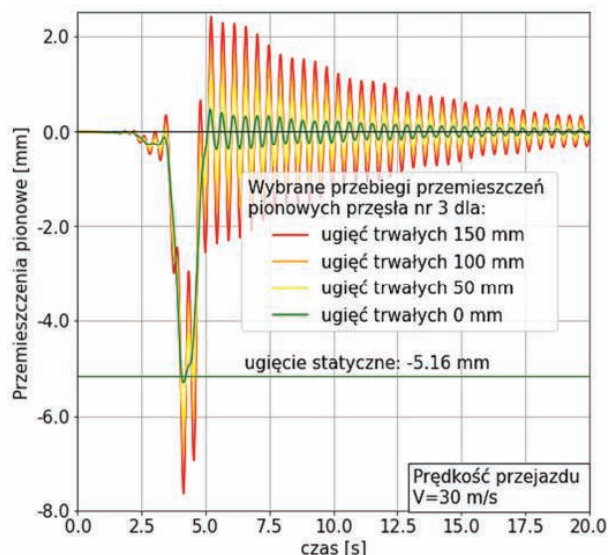
jazdów z prędkością około 23 m/s. Przykładowo dla trwałego ugięcia przęsła wynoszącego 100 mm:

- obliczona wartość maksymalnego ugięcia dynamicznego w przęśle nr 3 jest o 30 % większa od maksymalnego ugięcia statycznego (patrz rys. 8),
- wartość maksymalnego przyspieszenia drgań w przęśle nr 3 jest prawie 3 razy większa od maksymalnego przyspieszenia drgań przy przejeździe tego samego pojazdu z tą samą prędkością, ale po konstrukcji o idealnej geometrii (patrz rys. 9).
- Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że prędkość przejazdu rozpatrywanego typu pojazdu ciężarowego równa około 23 m/s (82,8 km/h) jest tzw. prędkością krytyczną. Amplitudy wielkości fizycznych, powstające w konstrukcji przęsła mostu przyjmują wówczas maksymalne wartości.
- Wzrost globalnych efektów dynamicznych w konstrukcji generowanych ruchem pojazdów jest w przybliżeniu wprost proporcjonalny do wartości trwałego ugięcia (rys. 10).

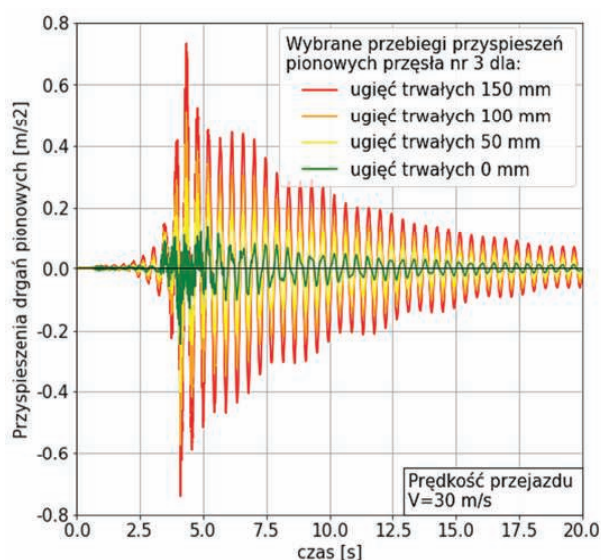
Podsumowanie

W niniejszym artykule wykazano, że trwałe ugięcia przęsła obiektów mostowych skutkujące podłużnymi nierównościami powierzchni jezdni mogą mieć zasadniczy wpływ na zwiększenie szeroko rozumianych efektów dynamicznych generowanych przez ruch pojazdów ciężarowych. Efekty te (nadmierne ugięcia dynamiczne konstrukcji, przyspieszenia drgań, a także naprężenia) są generalnie wprost proporcjonalne do wartości trwałego ugięcia i wpływają bardzo niekorzystnie na trwałość konstrukcji (np. związaną ze zmęczeniem materiału, znacząco zwiększając się wówczas zakresy zmienności naprężeń w dźwigarach głównych) oraz komfort użytkowników.

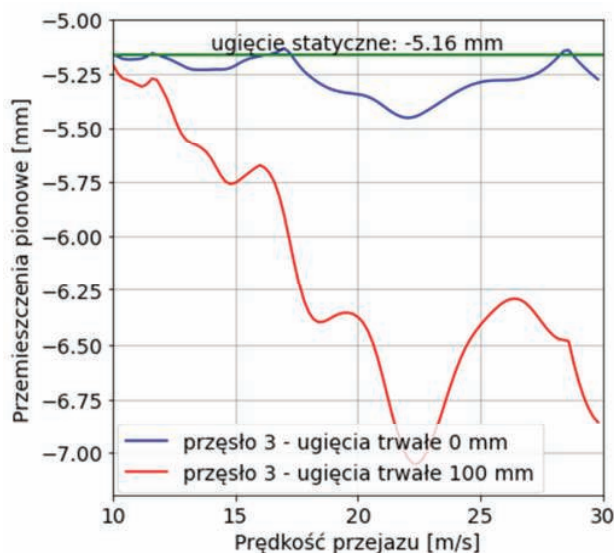
W sytuacji trwałych ugięć konstruk-



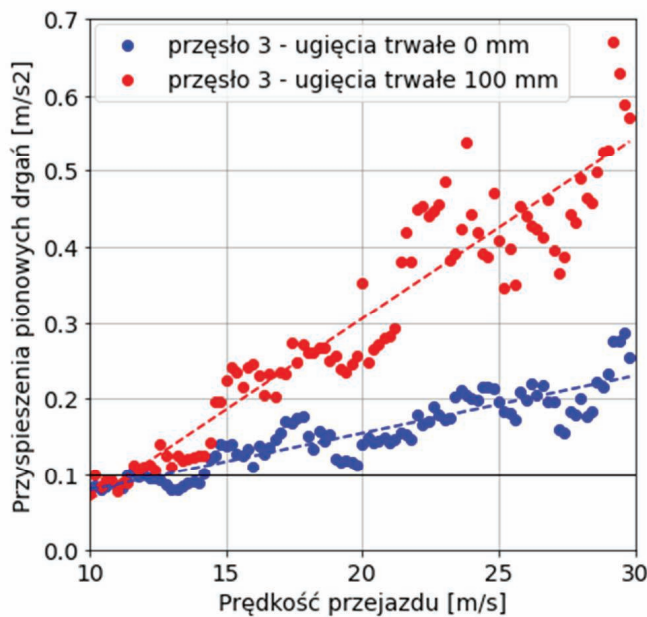
6. Zmiany przemieszczeń przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości przęsła nr 3 wywołane przejazdem 5-osowego pojazdu o masie 40 ton (prędkość pojazdu 30,0 m/s = 108 km/h), przy różnych wartościach trwałych ugięć: 0-150 mm



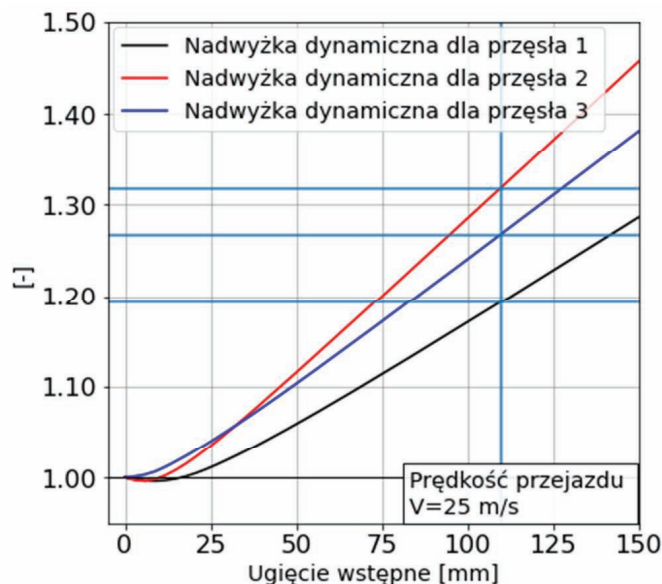
7. Zmiany przyspieszeń drgań przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości przęsła nr 3 wywołane przejazdem 5-osowego pojazdu o masie 40 ton (prędkość pojazdu 30,0 m/s = 108 km/h), przy różnych wartościach trwałych ugięć: 0-150 mm



8. Maksymalne ugięcia przekroju zlokalizowanego w połowie rozpiętości przęsła nr 3 w funkcji prędkości pojazdu i wartości trwałych ugięć (odpowiednio 0 mm i 100 mm)



9. Maksymalne przyspieszenia drgań przekroju zlokalizowanego w połowie rozpiętości przęseł nr 1-3 w funkcji prędkości pojazdu i wartości trwałych ugięć (odpowiednio 0 mm i 100 mm)



10. Zmiany wartości współczynnika przeciążeń dynamicznych wymuszonych przejazdem pojazdu w przekrojach zlokalizowanych w połowie rozpiętości przęseł nr 1-3 w funkcji wartości trwałych ugięć przęseł przy prędkości pojazdu równiej 25 m/s

cji mostowych, istotnym warunkiem bezpiecznej eksploatacji staje się kontrola i minimalizacja podłużnych nierówności nawierzchni jezdni, np. poprzez okresową wymianę warstwy ścieralnej nawierzchni jezdni.

W dalszych etapach prac badawczych planowana jest walidacja uzyskanych wyników analiz na podstawie wyników monitorujących, dynamicznych badań doświadczanych przeprowadzonych w warunkach normalnego użytkowania rozpatrywanego mostu, a także przeprowadzenie ana-

logicznych analiz symulacyjnych przy użyciu kompleksowego, przestrzennego modelu MES uwzględniającego wszystkie elementy przęseł mostu. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Guideline for modelling of deterioration in bridges, Deliverable D11, Final Report. Bridge Management in Europe – BRIME. Research Project, 4th Framework Programme, 1999 r.
- [2] Guideline for Load and Resistan-

ce Assessment of Railway Bridges. Final Report, Integrated Research Project "Sustainable Bridges", European Commission, 6th Framework Programme, 2007 r.

- [3] Guideline for the Assessment of Existing Structures. Final Report, Research Project "Structural Assessment Monitoring and Control – SAMCO", 2006.
- [4] Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level. COST Action TU1406, 2015-2019 r., Project Reports: <https://www.tu1406.eu/>
- [5] Fryba, L. (1999). Vibrations of Solids and Structure Under Moving Loads, 3-rd.ed., London: Thomas Telford.
- [6] Craig R.R. Jr., Kudrila A.J., Fundamentals of structural dynamics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [7] Paultre P., Dynamics of Structures, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [8] Lewandowski R., Dynamics of structures, Publishing house of the Poznań University of Technology, (in Polish).
- [9] Kłasztorny, Dynamics of Beam Bridges Loaded by High-Speed Trains, WNT Press, Warsaw, 2005, (in Polish).
- [10] Newmark N.M., A method of computation for structural dynamics, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 1959, 85 (EM3), 67-94.
- [11] Wanming Zhai, Zhaoling Han, Zhaowei Chen, Liang Ling & Shengyang Zhu (2019) Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review, Vehicle System Dynamics, 57:7, 984-1027.
- [12] Szafranski M., Impact of rolling stock on railway bridges at variable traffic parameters, doctoral dissertation, Gdansk University of Technology, Gdansk 2014.