

MIECZYSLAW RYBAK
Centralny Ośrodek Badań
i Rozwoju Techniki Drogowej

NIEKTÓRE WNIOSKI Z BADAŃ DYNAMICZNYCH MOSTÓW DROGOWYCH

Badania dynamiczne mostów drogowych są przeprowadzane w ramach Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Drogowej, jako badania "nadobowiązkowe" przy okazji badań statycznych. W pionie "drogowym" nie ma obowiązku wykonywania badań dynamicznych mostów. Wszelkie badania są przeprowadzane z inicjatyw własnych. Nie ma dotychczas jasno określonych warunków przeprowadzania tych badań zarówno jeśli chodzi o obciążenia, jak i pomiary, a szczególnie interpretację wyników.

Wynika to w znacznym stopniu stąd, że doraźne dynamiczne obciążenia nie stanowią z reguły zagrożenia dla konstrukcji. Takie zagrożenie może się pojawić po długotrwałej eksploatacji jako skutek zmęczenia konstrukcji, a szczególnie połączeń. Stosowane przy badaniach obciążenia z reguły nie są w stanie wywołać zagrożenia dźwigarów mostów średnich i większych rozpiętości, choć są w stanie wywołać niebezpieczne efekty w elementach pomostów.

W czasie przeprowadzania jednego z badań dynamicznych w COB i RTD wystąpiło pęknięcie pasa dolnego kratownicy, ale było to związane z określonymi wadami wykonawstwa.

Zakres pomiarów dynamicznych mostów w terenie jest z reguły ograniczony do pomiaru zmienności ugięć i ewentualnie naprężeń w kilku punktach. Jest to uboga podstawa do wnioskowania o pracy dynamicznej tak złożonej konstrukcji jak most, ale jednocześnie wystarczająca do wyciągania pewnych wniosków o użytkowym charakterze. Do tych wniosków można zaliczyć "współczynniki" dynamiczne, częstości drgań własnych, współczynniki tłumienia.

Wielkości naprężeń i ugięć mierzone przy przejazdach z różnymi prędkościami stanowią interesujący materiał. Wykonano stosunkowo dużo badań, ale dotyczyły one różnych obiektów. Nie widzę możliwości dokładnego omówienia wyników w krótkim referacie. Natomiast chciałbym ograniczyć się do dyskusji jednego czynnika, który towarzyszył wszystkim badaniom, a mianowicie wyraźnej niepowtarzalności wyników przy pozornie identycznych obciążeniach i prędkościach ruchu pojazdów. Czynnikiem ten jest bardzo istotny w ocenie poszczególnych wyników doświadczeń.

We wszystkich przypadkach, w których powtarzano przejazdy z podobnymi prędkościami otrzymano znaczne rozrzuty, niezależnie od typu ustroju czy typu obciążenia. Nie mają większego znaczenia ściśle określone dynamiczne wartości naprężeń lub ugięć uzyskane z pojedynczego doświadczenia. Znaczenie ma dopiero zbiór wartości, którego opracowanie może nastąpić tylko w oparciu o pojęcia statystyki z uwzględnieniem kilku zmiennych parametrów. Każdy pojazd stanowi integralną część drgającego układu most-pojazd i wnosi swe specyficzne cechy do otrzymanych wyników. Każda jezdnia posiada swe geometryczne cechy, które włączają się jako czynnik kształtujący wyniki pomiarów.

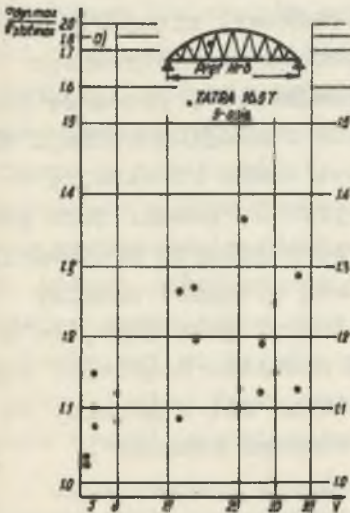
1. Czynniki zdeterminowane i przypadkowe w dynamicznej pracy mostów w warunkach eksploatacyjnych

Możemy przyjąć, że geometria ustroju nośnego mostu, jego dynamika bez udziału obciążenia i z obciążeniem statycznym ma charakter jednoznacznie określony.

Możemy również przyjąć jednoznaczność cech dynamicznych konkretnego pojazdu.

Nie możemy natomiast spodziewać się jednoznaczności, gdy założymy przypadkowy rozkład, nawet niewielkich nierówności, oraz gdy założymy możliwość przypadkowych przesunięć fazowych drgań własnych pojazdu i ewentualnie stanu drgań mostu. Efekty dynamiczne wtedy będą funkcją również wymienionych przypadkowych parametrów i zamiast punktu dla określonej prędkości oraz linii dla szeregu prędkości otrzymamy ich zbiór zajmują-

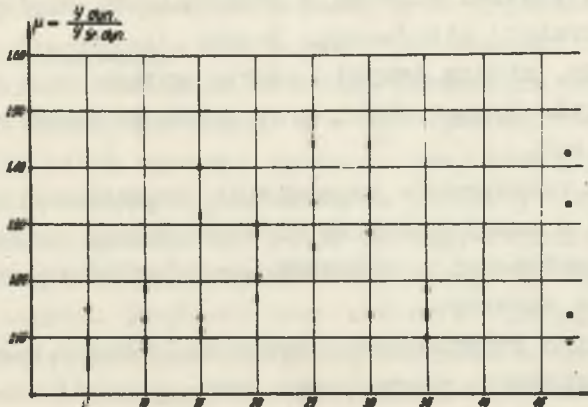
cy pewien obszar w diagramie zależności: naprężenie maksymalne-prędkość lub ugięcie maksymalne-prędkość. Ilustrują to przykładowo rysunki 1 i 2.



Rys. 1

W przypadku mostów większych rozpiętości lub szerokości (przy założeniu przestrzennej współpracy) posługiwanie się pojedynczym pojazdem dla określenia efektów dynamicznych zarówno w doświadczeniu jak i w obliczeniach nie ma sensu i może stanowić tylko pomocniczy materiał nie mający istotnego znaczenia dla oceny pracy dynamicznej dźwigarów.

Jeśli przyjmiemy model grupowego obciążenia otrzymujemy dodatkowe źródła przypadkowości w postaci zmiennej odległości poszczególnych pojazdów, przesunięć fazowych ich własnych drgań oraz oczywiście wpływu nierówności. W COB i RTD przeprowadzano badania co najwyżej przy dwóch ciężkich samochodach jednocześnie.



Rys. 2

Wyniki badań mostów są końcowym efektem łącznego oddziaływania bardzo wielu czynników, które przy każdej jeździe tego samego pojazdu z tą samą prędkością mogą prowadzić do bardzo różnych wyników. Rozdzielenie wpływu niektórych z wymienionych czynników zostało dokonane przez Wena i Veletsosa w pracy [1].

Nierówności rozłożone w sposób przypadkowy, nieuporządkowany, można przedstawić przy pomocy aparatu statystycznego stosowanego zazwyczaj dla określenia wielkości i procesów losowych. Istotne znaczenie ma wyznaczenie funkcji korelacji dla różnych prędkości ruchu, określenie tzw. czasu korelacji, a następnie charakterystyk spektralnych profilu jezdni jako pewnej realizacji procesu losowego dla poszczególnych prędkości. Interesującym wnioskiem z przeprowadzonej wstępnej analizy statystycznej kilku odcinków profilów jezdni jest fakt, że w miarę wzrostu prędkości ruchu spektrum rozkładu częstości staje się coraz bardziej równomierne zbliżając się w granicy do wielkości stałej odpowiadającej tzw. "białemu szumowi".

Innym wnioskiem jest stwierdzenie silnych koncentracji spektralnej gęstości w zakresie niewielkich częstości w przypadku ruchu o niskich prędkościach. Praktyczne konsekwencje tego stanu rzeczy mają duże znaczenie.

Nieuporządkowane nierówności mogą stać się czynnikiem wzbudzenia znacznych efektów dynamicznych przy niewielkich prędkościach ruchu, dla których występuje pokrywanie się częstości drgań własnych pojazdu w ruchu z maksymalnymi rzędnymi funkcji gęstości spektralnej nierówności jezdni.

W tym należy, między innymi, szukać wyjaśnienia często znacznych efektów dynamicznych przy ruchu pojazdów z niewielkimi prędkościami.

Analityczne rozwiązanie zagadnienia dynamicznej pracy układu most-pojazd z uwzględnieniem kinematycznego wymuszenia drgań przez nierówności o przypadkowym rozkładzie stanowi problem dotychczas otwarty.

Innym rodzajem przypadkowego wymuszenia drgań mostu jest jednoczesne obciążenie mostu przez grupę pojazdów znajdujących się w ruchu. Zagadnienie w aspekcie statycznym być przedmio-

tem analizy stochastycznej kilku autorów japońskich w ramach referatów zgłoszonych na kongresie w Oporto [3]. Próby rozwiązań dynamicznego zagadnienia przy grupowym obciążeniu przy losowych parametrach rozkładu pojazdów i przesunięć fazowych drgań własnych pojazdów nie zostały dotychczas podjęte.

Tymczasem dla mostów znacznych rozpiętości lub szerokości wyniki uzyskane w doświadczeniach lub obliczeniach dla pojedynczego pojazdu nie są miarodajne dla obciążeń grupowych. W przeprowadzonych doświadczeniach z grupowymi przejazdami otrzymano z reguły niższe proporcjonalnie wielkości nadwyżek dynamicznych w naprężeniach i ugięciach. Związane to jest z faktem występowania różnic w fazie drgań poszczególnych pojazdów, różnym położeniem pojazdów na moście, co przy drganiach parametrycznych jakim podlega most ma również znaczenie. Z tymi założeniami wiąże się przekonanie, znajdujące coraz szersze zrozumienie, że można w ogóle zrezygnować z uwzględniania wpływów dynamicznych na dźwigary mostów znacznych rozpiętości.

2. Nierówności "uporządkowane"

Pojedyncze lub grupy nierówności cechujące się już to szczególnymi rozmiarami lub prawidłowym rozmieszczeniem, stanowią zdeterminowane źródło dynamicznego wymuszenia, szczególnie niebezpieczne dla obiektów mostowych. Narzucają one konstrukcji impulsowe wymuszenia, których efekt końcowy zależy od cech dynamicznych i geometrycznych pojazdu oraz prędkości jego ruchu

Pojedyncza nierówność. Dla pojazdu dwuosiowego o rozstawie "a" otrzymujemy zastępczą częstość wymuszenia dominującą proces wymuszania drgań wynoszącą: $\omega = \frac{2\pi v}{a}$, gdzie: v - prędkość ruchu. Z chwilą kiedy wystąpi zgodność owej zastępczej częstości z częstością kołową drgań własnych pojazdu, otrzymujemy zwielokrotnienie impulsu, zaś jeśli do tego dojdzie zgodność z częstością drgań własnych mostu obciążonego wystąpi maksimum efektu dynamicznego. Prędkość przy której to nastąpi może być nazwana lokalną prędkością krytyczną związaną z określonym pojazdem. I tutaj spotkamy rozrzuty zależne od przesunięcia

fazowego drgań mostu i pojazdu w momencie przekraczania przeszkody.

W przypadku pojazdu trójosiowego przejazd przez przeszkodę pojedynczą wywołuje dwa impulsy cechujące się różnymi częstościami zastępczymi zależnymi od rozstawu osi $\omega_1 = \frac{2\pi v}{a}$, $\omega_2 = \frac{2\pi v}{c}$, gdzie: "a" i "c" są odległościami osi między sobą. Wobec tego, że w przypadku typowych samochodów ciężarowych wielkości a i c różnią się między sobą, występuje wytłumianie drgań. W tym przypadku mamy do czynienia z dwoma możliwymi dodatkowymi prędkościami krytycznymi odpowiadające następującym warunkom:

$$T_0 = T_v = T_{y1}$$

oraz

$$T_0 = T_v = T_{y2}$$

gdzie: $T_{y1} = \frac{2\pi}{\omega_1}$, $T_{y2} = \frac{2\pi}{\omega_2}$ - zastępcze okresy dynamicznego wymuszenia drgań przez nierówność przy przejeździe pojazdu trójosiowego. T_0 - okres drgań własnych mostu, T_v - okres drgań własnych pojazdu. W ten sposób otrzymujemy całą grupę prędkości przy których występuje możliwość lokalnych maximów efektów dynamicznych. Oto te prędkości:

$$v = \frac{a}{T_0}, v = \frac{a}{T_v}, v = \frac{c}{T_0}, v = \frac{c}{T_v}.$$

W następnej kolejności należy rozważyć wpływ położenia nierówności na wielkość efektów dynamicznych. Możemy wprowadzić pojęcie krytycznej odległości nierówności od środka belki lub ogólnie mostu. Jest to taka odległość, przy której efekty impulsów będą maksymalne. Jeśli określimy tę odległość symbolem " d_{kr} ", możemy ją wyznaczyć zgodnie z prostym wzorem:

$$d_{kr} = T_0 \cdot v_{kr}$$

Jest to odległość, którą musi przebyć rozpatrywana oś pojazdu, aby znaleźć się w środku mostu w czasie odpowiadającym podstawowemu okresowi drgań własnych mostu. Dla dużych rozpiętości wielkość d_{kr} jest niewielka w porównaniu z rozpiętością. Inaczej dzieje się w przypadku małych mostów. Wtedy krytyczna odległość przesuwa się w kierunku podpory od strony wjazdu, zaś przy dostatecznie małych rozpiętościach może znaleźć się nad podporą lub leżeć nawet poza przesłem.

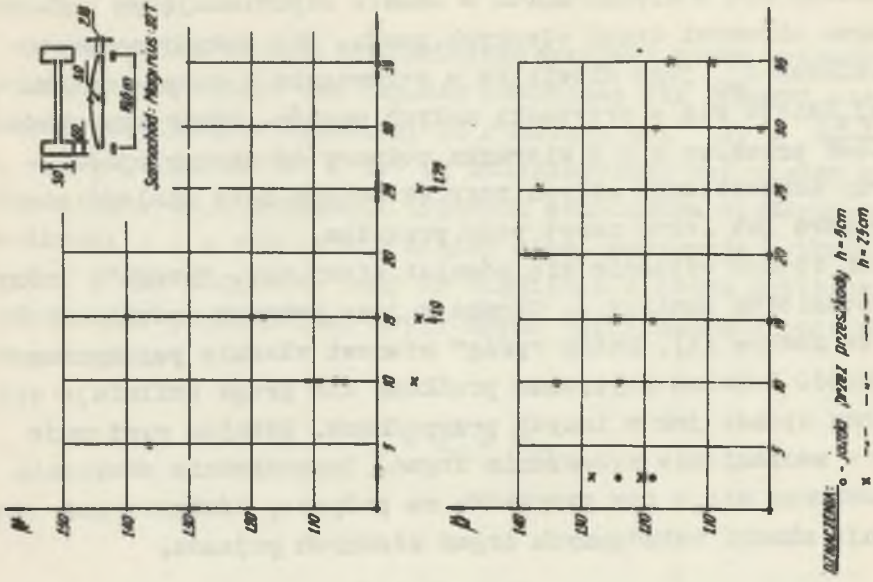
W ten sposób wyjaśnia się również efekt tzw. "progu", który był przedmiotem analizy J. Głomba w jego pracach poświęconych dynamice mostów [4]. Każdy "próg" stanowi właśnie pojedynczą nierówność. Lokalna krytyczna prędkość dla progu definiuje się w podobny sposób jak w innych przypadkach. Różnica występuje jednak w mechanizmie wzbudzania drgań. Bezpośrednie uderzenia kół przenoszą się w tym przypadku na podporę, dźwigary zaś przejmują skutki wzbudzonych drgań własnych pojazdu.

Nierówności grupowe

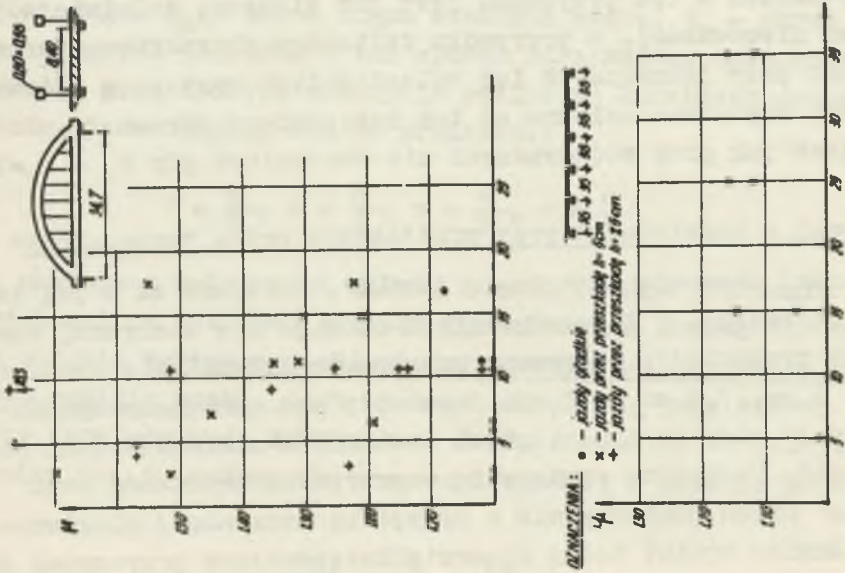
Jeśli kilka nierówności leży w osi przejazdu, występuje nałożenie się drgań pochodzących z różnych impulsów. Liczba krytycznych prędkości w tym przypadku jest już większa, zależnie od rozstawu nierówności. W przypadku falistego charakteru nierówności lub przy jednakowych ich odległościach występują główne prędkości krytyczne zależne od ich zastępczego okresu T_v . Ma to miejsce jak przy pojedynczych nierównościach gdy $T_o = T_v = T_v$.

3. Wnioski z doświadczeń przy przejazdach przez "przeszkody"

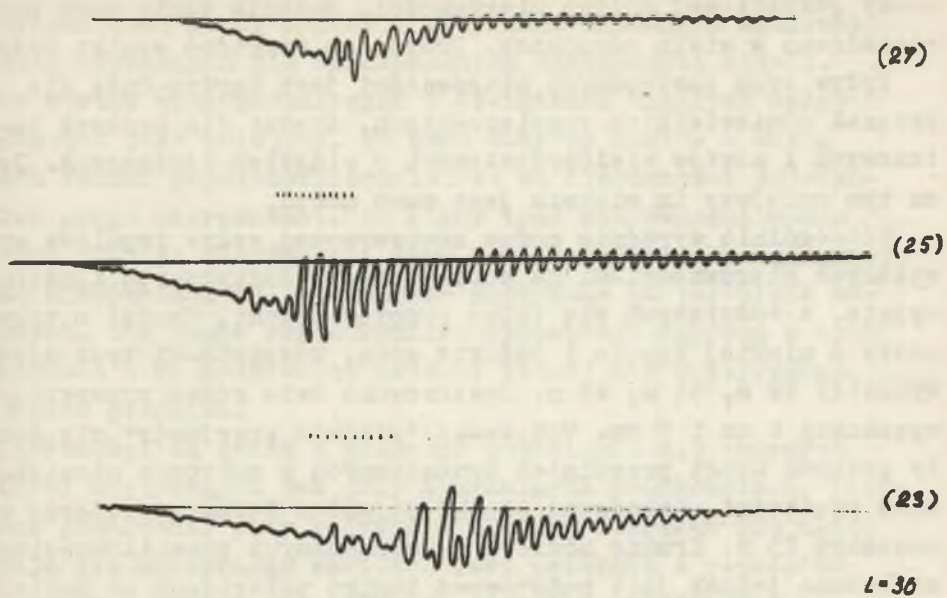
Nierówności stanowią "patologię jezdni". Związane są z jej wadami i defektami. W doświadczeniach stosuje się zazwyczaj tzw. sztuczne przeszkody. Stosowano przeszkody drewniane o wysokości 2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm i 10 cm. Stanowiły one zastępczy sposób sprawdzenia efektów dynamicznych wywołanych nierównościami pojedynczymi. Mechanizm wymuszenia w przypadku przeszkód tego typu jest nieco odmienny niż w przypadku naturalnej nierówności. Niemniej wyniki badań stanowią interesujący przyczynek do



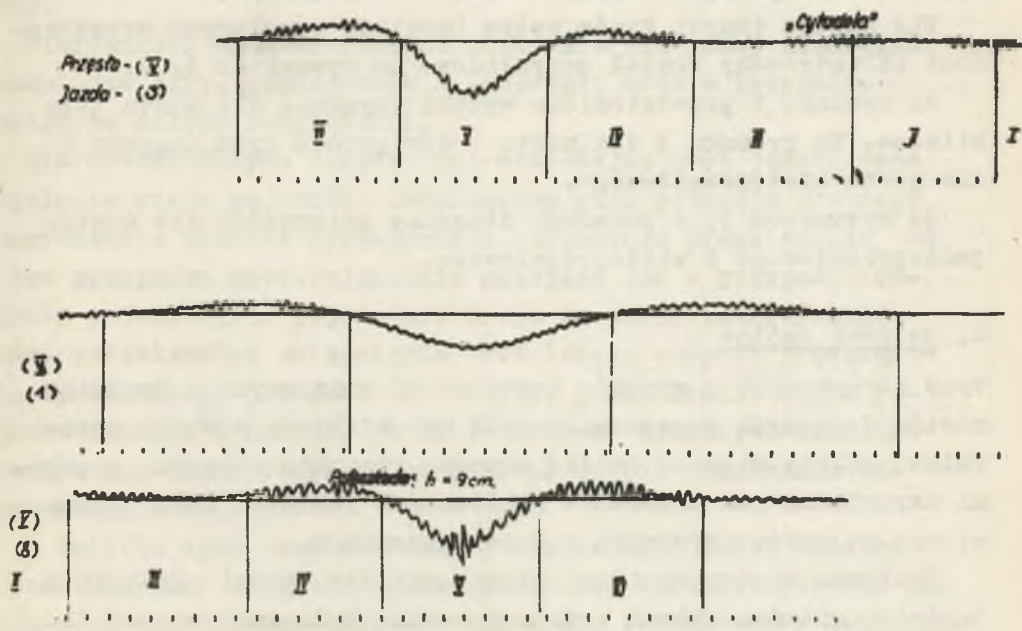
Rys. 4



Rys. 3



Rys. 5



Rys. 6

oceny jakościowej wpływu nierówności. Badania takie były przeprowadzane w wielu ośrodkach. Przytoczę niektóre wyniki badań.

Wpływ tych zastępczych nierówności jest bardzo duży dla przęseł o niewielkich rozpiętościach, średni dla przęseł betonowych i mostów wieloprzęsłowych o ciągłych dźwigarach. Jest on tym mniejszy im większa jest masa mostu.

Szczególnie wyraźnie można zaobserwować wpływ impulsów wywołanych nierównościami na serii mostów identycznych konstrukcyjnie, a różniących się tylko rozpiętościami. Chodzi o trzy mosty o niskiej kracie i jeździe górą. Rozpiętości tych mostów wynosiły 24 m, 36 m, 48 m. Zastosowano dwie różne przeszkody o wysokości 4 cm i 8 cm. Tak zwane "gładkie przejazdy" nie dawały godnych uwagi przeciążeń dynamicznych w zakresie niewielkich prędkości. Stosowano ciężki pojazd o łącznym ciężarze wynoszącym 25 t. Trudno mówić o jednoznacznych prawidłowościach, zachowana jednak jest podstawowa logika polegająca na zmniejszaniu się efektów dynamicznych wraz ze wzrostem masy konstrukcji co w tym przypadku wiązało się z rozpiętością.

Dla mostów innych typów wpływ impulsów wywołanych przeszkodami zilustrowany został przykładowo na rysunkach 3, 4.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki uzyskane dla mostu typu Nilsona. Na rysunku 3 dla mostu o dźwigarach typu Langerera i dla mostu wieloprzęsłowego.

Na rysunkach 5, 6 pokazano diagramy zmienności dla mostów jednoprzęsłowego i wieloprzęsłowego.

4. Wnioski ogólne

Przy korzystaniu z wyników doświadczeń związanych z dynamiką mostów drogowych przeprowadzanych na obiektach w skali naturalnej należy mieć na uwadze znaczne rozrzuty związane z takimi czynnikami jak naturalne nierówności jezdni i cechy dynamiczne pojazdów używanych w doświadczeniach.

Ponieważ między wynikami uzyskanymi dla jezdni gładkich i jezdni z nierównościami istnieje bardzo duża rozbieżność dla przęseł swobodnie podpartych, należy brać ją pod uwagę w oce-

nie dynamicznej pracy mostów i przy konfrontacji z wynikami obliczeń uzyskanych dla uproszczonych zastępczych modeli.

Dla mostów wieloprzęsłowych o dźwigarach ciągłych wpływ nierówności jest mniejszy. To samo dotyczy mostów o wielu pasmach ruchu. Najniebezpieczniejsze są nierówności pojedyncze lub grupy nierówności. Do klasy tych nierówności można zaliczyć również nierówności typu tzw. "progów". Do tej grupy należą nierówności faliste często spotykane na jezdnich asfaltowych. Tak zwane współczynniki dynamiczne wynoszą w tych przypadkach o kilkadziesiąt procent więcej niż w przypadku przejazdów gładkich.

Nierówności są jedną z przyczyn pojawiania się umownych prędkości krytycznych już przy minimalnych prędkościach. Liczba tych prędkości, przy których wielkości naprężeń lub ugięć osiągają swe maksymalne wartości jest związana z rozkładem nierówności i typami pojazdów. W przypadku nierówności rozproszonych otrzymujemy widmo ciągle rozkładu częstości wymuszeń.

Nierówności mają szczególne znaczenie dla pracy elementów jezdni jak płyt, poprzecznic i podłużnic oraz w przypadku dźwigarów małych rozpiętości.

Dla mostów dużych rozpiętości miarodajne jest jednoczesne działanie wielu pojazdów. Jednoczesny ruch pojazdów powoduje rozproszenie efektów dynamicznych. Wypadkowe przeciążenia są w tym przypadku proporcjonalnie mniejsze jak w przypadku obciążeń pojedynczymi pojazdami. Droga do oceny teoretycznej prawdopodobieństwa osiągnięcia określonego stopnia przeciążenia dynamicznego prowadzić może tylko przez zastosowanie rachunku funkcji losowych. Istnieje znikome prawdopodobieństwo wystąpienia współbrzmienia wszystkich części wymuszenia poszczególnych pojazdów.

W świetle tych uwag nie należy wiązać zbyt dużej nadziei z możliwościami obliczeń dynamicznych dla mostów. Spełniać one będą rolę pomocniczą w kształtowaniu się obrazu pracy dynamicznej mostów. W przypadku mniejszych mostów należałoby w modelu podstawowym belki obciążonej ruchomym pojazdem uwzględnić za-

równu umowne charakterystyki sprężystościowe pojazdu jak i uproszczone zastępcze nierówności pojedyncze o krytycznym położeniu lub sinusoidalne.

LITERATURA

- [1] Wen R., Veletsos J.: Dynamic behavior of simple highway bridges.
- [2] Symposium on loading of highway bridges. Volume II. Oprac. to 1956 r.
- [3] Głomb J.: Niektóre zagadnienia dynamiki mostów drogowych.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Резюме

Показано и рассмотрено результаты исследований, проведенных на шоссежных мостах во время продвижения тяжёлых грузовых машин по неровному в пределах моста настилу.

SOME RESULTS OF DYNAMIC TESTS OF HIGHWAY BRIDGES

Summary

The results of investigations carried out on road bridges during the crossing of heavy vehicles on the rough surface of the bridge, have been presented and discussed.