ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967
Seria: BUDOWNICTWO z. 20 Nr kol. 201

JÓZEF GŁOMB, STEFAN JENDRZEJEK
JERZY WESELI
Katedra Budowy Mostów
Politechniki Śląskiej

ANALIZA NIEKTÓRYCH MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA OBLICZEŃ DYNAMICZNYCH W PROJEKTOWANIU MOSTÓW DROGOWYCH

1. Potrzeba wprowadzenia metody obliczenia dynamicznego

Stosowany obecnie w projektowaniu mostów współczynnik dynamiczny (WD) reprezentujący całość wpływu dynamicznego obciążenia, budzi poważne zastrzeżenia jako wielkość dobrana przypadkowo i niejednoznaczna.

Wiadomo bowiem, że współczynnik ten:

a) może być określany jako funkcja sił (zewnętrznych lub wewnętrznych uogólnionych), odkształceń (ugięcia, kąty, zmiany długości) lub naprężeń (σ wzgl. τ),

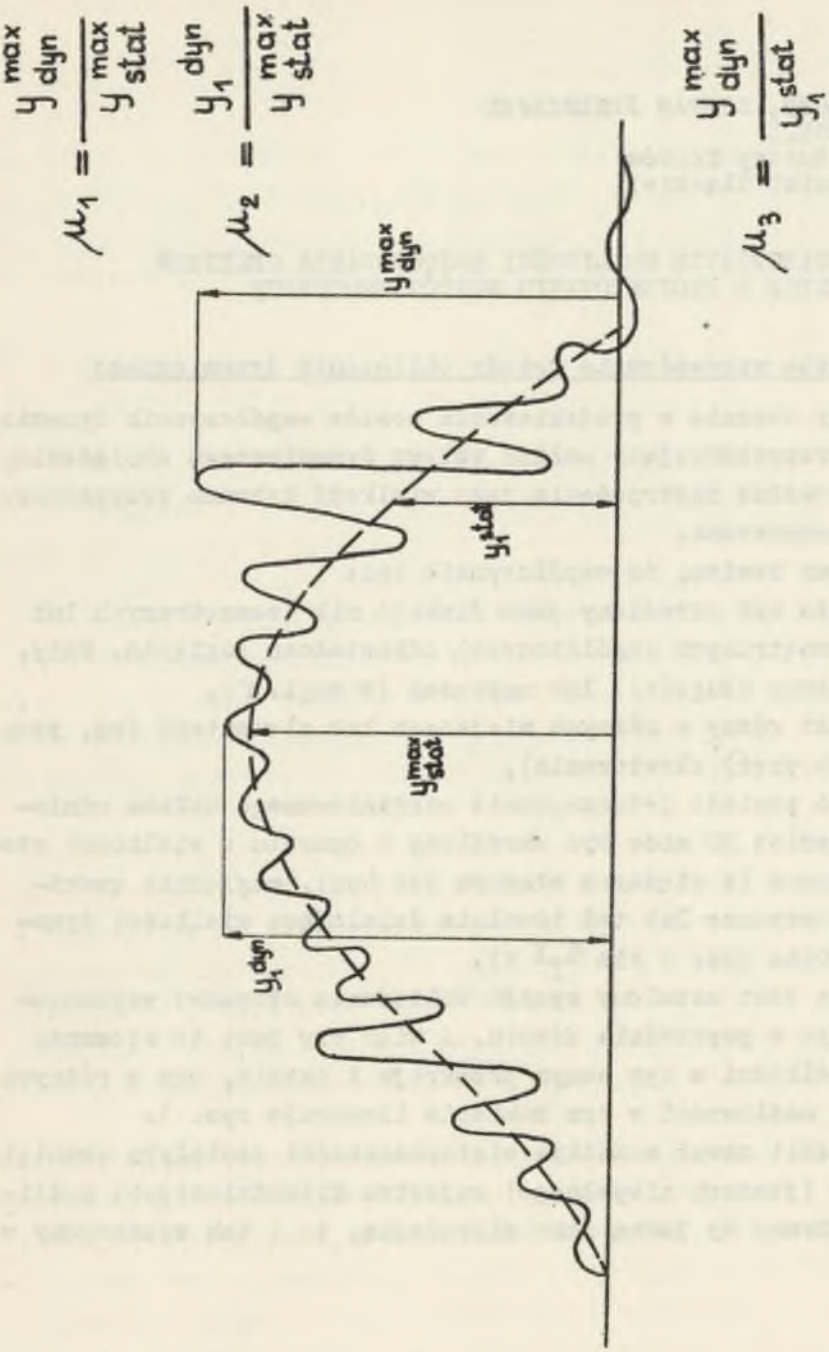
b) jest różny w różnych miejscach lub elementach (np. pasy lub pręty skratowania),

c) nie posiada jednoznacznie zdefiniowanego układu odniesienia: WD może być określany w oparciu o wielkości statyczne (z ciężarem własnym lub bez), względnie quasi-statyczne lub też idealnie działające wielkości dynamiczne (np. $A \sin \frac{\pi v}{l} t$),

d) nie jest ustalony sposób obliczania stosunku wspomnianego w poprzednim zdaniu. A więc czy jest to stosunek wielkości w tym samym przekroju i czasie, czy w różnych.

Różne możliwości w tym zakresie ilustruje rys. 1.

Ale jeśli nawet wszelkie wieloznaczności zostałyby usunięte i z tego (jeszcze niepełnego) rejestru kilkudziesięciu możliwości wybrano by jedną jako miarodajną, to i tak wyznaczony w


$\mu_1 = \frac{y^{max}_{dyn}}{y^{max}_{stat}}$
$\mu_2 = \frac{y^{dyn}_1}{y^{max}_{stat}}$
$\mu_3 = \frac{y^{max}_{dyn}}{y^{stat}_1}$
y^{max}_{dyn}
y^{stat}_1
y^{max}_{stat}
y^{dyn}_1

Rys. 1

ten sposób współczynnik dynamiczny jest dla projektowania mało użyteczny, gdyż nie uwzględnia:

a) specyfiki działania obciążenia (np. pulsacja, faza wejścia) ani prędkości i w związku z tym nie daje możności kontroli określonego mostu (np. przy próbnym obciążeniu dynamicznym), a także porównywania wyników uzyskanych z badań różnych mostów,
b) istotnych odrębności występujących w pracy mostów różnych rozpiętości,
c) różnic w układzie konstrukcyjnym mostów (np. mosty belkowe czy kratowe, charakter pomostu, warunki podparcia itp.).

Z powyższych uwag widać, że stosowany dotychczas w praktyce projektowej WD jest wielkością mało precyzyjną i obarczoną błędem znacznie większym niż inne fragmenty obliczenia mostu.

Jeśli tak jest, to stosowane dotychczas obliczenia statyczne korygowane WD są również niedokładne i nie dają wystarczającego rozpoznania stopnia wytężenia elementów konstrukcji.

Nic w tym nie mogą zmienić jakiekolwiek korekty wzorów na WD. Dyskusji podlega bowiem nie charakter krzywej dodatku dynamicznego, lecz w pierwszym rzędzie, to czy może taka krzywa istnieć.

Dlatego też nie ma istotnego znaczenia fakt, że obecnie obowiązujące liczbowe wartości WD dla mostów drogowych zostały ustalone w oparciu o milczące lecz - jak łatwo wykazać - fałszywe założenie, że istnieje podobieństwo charakteru i wielkości zjawisk dynamicznych w mostach drogowych i kolejowych.

Są to więc wartości nieprecyzyjne i właściwie - można powiedzieć - błędne zarówno co do charakteru krzywej jak i wartości.

Omawiając sprawę współczynnika dynamicznego wspomnieć trzeba również, że istotą pracy każdego mostu - nie tylko kolejowego - lecz (przy obecnie stosowanych przekrojach elementów, obciążeniach i prędkości) również i drogowego jest praca dynamiczna. A nasz statyczny model obliczeniowy nie odpowiada rzeczywistemu charakterowi pracy materiału obiektu.

Korelacji między tym modelem obliczeniowym, a rzeczywistym stanem wytężenia znowu musimy szukać przez jakieś nowe współczynniki, o których da się powiedzieć dokładnie to samo co poprzednio powiedziano o WD.

Główną sprawą w każdej pracy naukowej z zakresu teorii konstrukcji jest możliwie maksymalne zbliżenie się z obliczeniem do rzeczywistych warunków pracy obiektu.

A ponieważ jak wykazano poprzednio korelacja między obliczeniem statycznym i rzeczywistymi warunkami pracy mostu - nie istnieje przeto winniśmy szukać takiej metody, która stara się możliwie dokładnie opisać faktyczną pracę obiektu.

Jedyną taką metodę stanowi obliczenie dynamiczne. Przedstawienie tego problemu nie było możliwe w latach poprzednich. Dopiero obecnie, kiedy tak maszyny cyfrowe, jak i układy analogowe pozwalają nam pokonywać trudności obliczeniowe - celowe jest rozwinięcie dyskusji nad tym ważnym zagadnieniem.

2. Obciążenie statyczne i dynamiczne.

Można w ogólności zauważyć, że na moście drogowym mamy do czynienia z dwoma rodzajami obciążeń różniącymi się między sobą tak wielkością, jak i sposobem działania.

Pierwszy rodzaj to obciążenie użytkowe występujące normalnie i działające dynamicznie.

A rodzaj drugi to obciążenie duże, występujące wyjątkowo i działające statycznie (tzw. zator) lub quasi-statycznie (ciężkie zestawy transportowe itp.).

I dlatego też każdy z obu sposobów obliczenia powinien wychodzić z innego poziomu obciążeń.

Nie wdając się tutaj w szczegółowe rozważania można za podstawę obliczenia dynamicznego przyjąć tylko dwa ciężkie ale realne pojazdy, a więc obciążenie, które dla trójpasmowego mostu I kl. wynosi ok. 50-60% normowego obciążenia statycznego. Jest to tzw. dynamiczne obciążenie miarodajne.

Zakres rozpiętości, dla których właściwe byłoby zastosowanie obliczenia dynamicznego oszacowano przez porównanie ugięć

przy statycznym działaniu obciążenia typu "zator" i dynamicznego obciążenia miarodajnego.

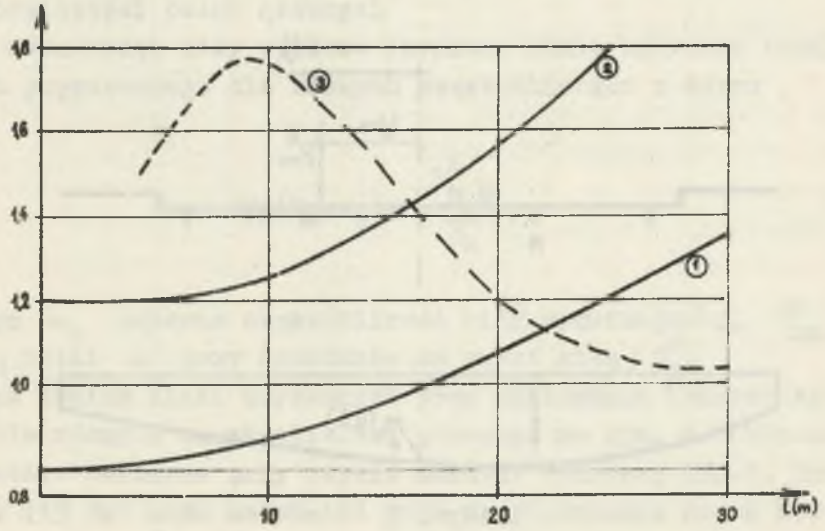
Oszacowanie zostało przeprowadzone dla dwóch przypadków:

a) mosty dwupasmowe b = 7,0 m

b) mosty trójpasmowe b = 10,5 m.

Przy określeniu maksymalnego obciążenia statycznego porównywano momenty od obciążenia normowego I kl. (oczywiście bez współczynnika dynamicznego) oraz obciążenia zatorem złożonego z najcięższych kursujących aktualnie na naszych drogach pojazdów, a więc samochódów-wywrotek typu Tatra ciężka o ciężarze w stanie załadowanym 23,4 T.

Jako dynamiczne obciążenie miarodajne przyjęto jednolicie (tak dla mostów dwu jak i trójpasmowych) zgodne w fazie działanie dwóch wywrotek typu Tatra-ciężka mogących rozwijać prędkość do 60 km/godz.



Rys. 2

Wykres na rys. 2 przedstawia porównanie ugięć mostów przy statycznym ("zator") i dynamicznym obciążeniu miarodajnym. Tutaj linie 1 i 2 obrazują stosunek momentów od obciążenia statycznego do momentów od statycznego działania obciążenia

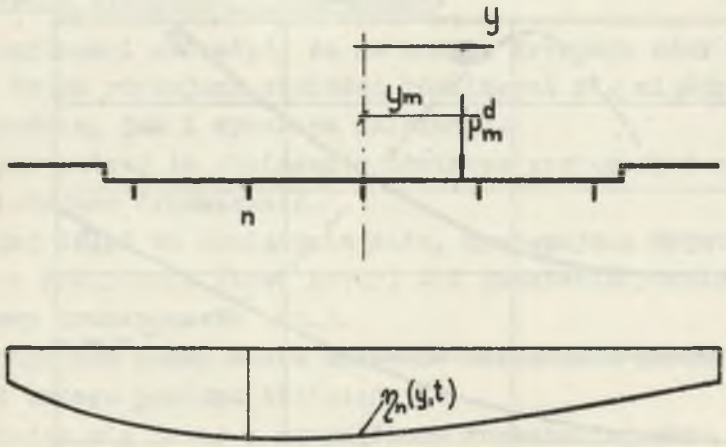
dynamicznego skorygowanych na skutek obniżenia naprężeń dopuszczalnych: 1 - most dwupasmowy, 2 - most trójpasmowy.

Linia 3 obrazuje stosunek dynamicznego obciążenia miarodajnego działającego dynamicznie do tego samego obciążenia działającego statycznie.

Można z tego odczytać, że obliczenie dynamiczne winno być stosowane w mostach drogowych ..wupasmowych do ok. 22 m, a trzypasmowych do ok. 16 m.

3. Zagadnienie rozkładu poprzecznego przy obciążeniu dynamicznym

Jak wynika z powyższych uwag, zakres obliczeń dynamicznych mostów drogowych rozciąga się na mosty mniejszych rozpiętości. Nie sposób więc tutaj abstrahować od poprzecznego rozdziału obciążenia.



Rys. 3

Chcąc obliczyć wydzieloną belkę mostu pokazanego na rys. 3 możemy siły dynamiczne P_m^d sprowadzone do środka rozpiętości mostu pomnożyć przez pewną liczbę wpływową η aby otrzymać

wielkość sprowadzanego na tę belkę obciążenia, przy czym

$$\eta = \sum_m \eta_n(y_m,t) \tag{1}$$

Funkcja $\eta_n(y,t)$ w obliczeniach statycznych jest niezależna od czasu i nosi nazwę linii wpływowej rozkładu poprzecznego. Wyznaczenie krzywej odpowiadającej tej funkcji jest jednym z podstawowych elementów obliczenia statycznego ustroju nośnego mostu. Sposób ten, aczkolwiek obarczony pewnymi znanymi niedokładnościami i uproszczeniami, jest przejrzysty technicznie i przemawia do projektanta, zatem wart jest zachowania i uogólnienia na obszar obliczenia dynamicznego.

Przyjmując pewne uproszczenia w postaci:

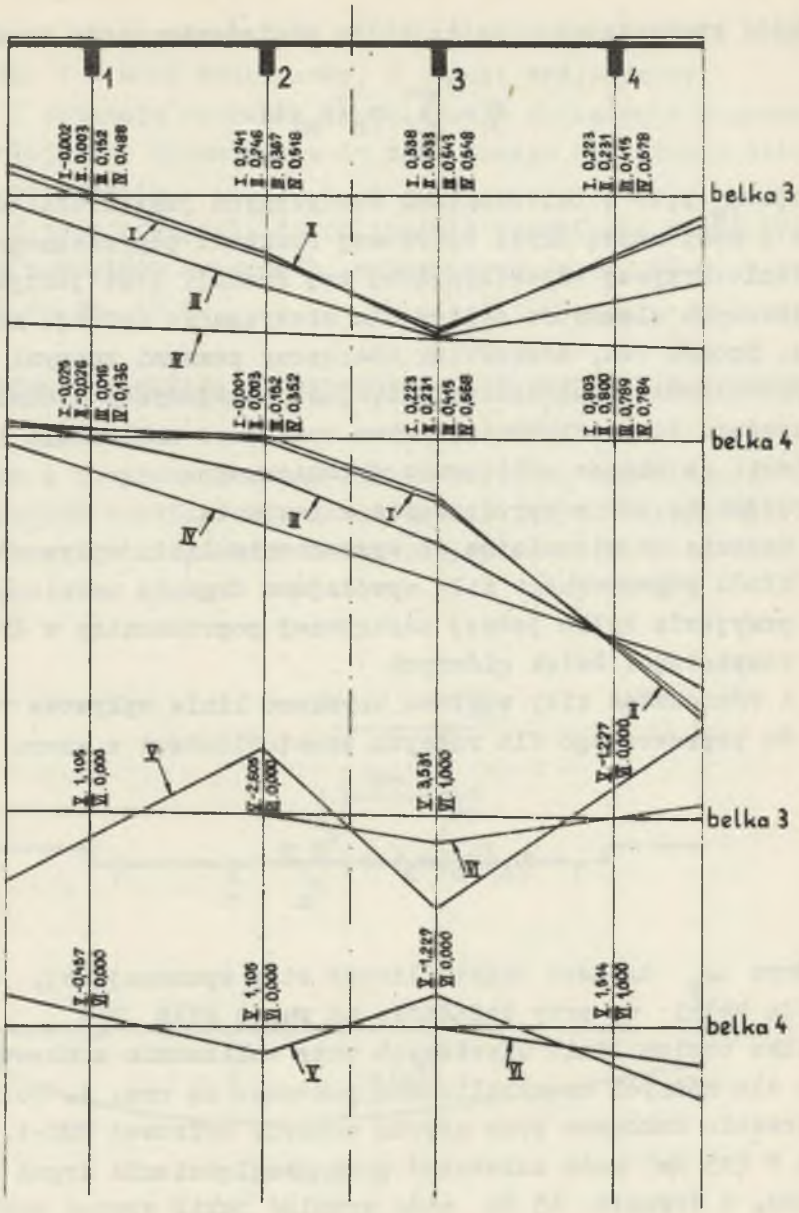
- uznania za miarodajną do wyznaczenia linii wpływowej rozkładu poprzecznego siłę wywołującą drgania ustalone,
- przyjęcia tylko jednej zastępczej poprzecznicy w środku rozpiętości belek głównych
- i równoważąc siły węzłowe uzyskano linie wpływowe rozkładu poprzecznego dla różnych częstotliwości z wzoru

$$\eta_n(y_m,\omega_p) = \frac{R^d_{n\,m}}{P^d_m} \tag{2}$$

w którym ω_p oznacza częstotliwość siły wymuszającej, R^d_{nm} - reakcję belki n przy działaniu na ruszt siłą P^d_m.

Kilka takich linii uzyskanych przy obliczaniu konkretnego mostu dla różnych częstotliwości pokazano na rys. 4. Obliczenie zostało dokonane przy użyciu maszyny cyfrowej UMC-1. Przypadek V (15 Hz) może zaistnieć przy uwzględnieniu drgań kół pojazdu, a drgania 45 Hz może wywołać jakiś sprzęt mechaniczny pracujący na moście.

Da się zauważyć, że ze względu na niezbyt duże różnice pomiędzy liniami wpływowymi dynamicznego rozkładu poprzecznego, tj. funkcjami $\eta(\omega_p)$ dla różnych praktycznie ważnych częstości



I - $n_p = 0$; II - $n_p = 2{,}0$ Hz ($\omega_p = 12{,}56$ sek^{-1}) ; III - $n_p = 6{,}0$ Hz ($\omega_p = 37{,}7$ sek^{-1})
IV - $n_p = 7{,}16$ Hz ($\omega_p = 45$ sek^{-1}) - rezonans ; V - $n_p = 15{,}0$ Hz ; VI - $n_p = 45{,}0$ Hz

Rys. 4

obciążenia możliwe jest przyjęcie jako miarodajnej średniej wartości η odpowiadającej zakresowi drgań nadwozia rozpatrywanych ciężkich pojazdów.

4. Funkcja obciążenia (charakter prawej strony równania ruchu belki)

4.1. Uwagi wstępne

Szukana funkcja obciążeń drogowych, jeśli ma być zastosowana w obliczeniach technicznych winna uwzględniać następujące główne wpływy:

1. Pulsacyjne działanie obciążenia. W ogólności rozpatrywana winna być zarówno pulsacja pionowa, jak i drgania skrętne-podłużne.
2. Tłumienie impulsu wywołanego przez efekt progowy.
3. W zależności od rozpiętości mamy do czynienia z układem dwóch osi lub zastąpić możemy pojazd jedną siłą działającą impulsowo lub quasi-statycznie.
4. Efekt rozkładu poprzecznego obciążenia w ruszcie.

Jednym z głównych czynników determinujących charakter funkcji obciążenia jest rozpiętość mostu.

I tak np. dla mostów drogowych dadzą się wydzielić następujące zakresy rozpiętości.

4.2. Mosty bardzo małe: $5-6 < l \leq 10 - 12$ m

W mostach tej grupy mamy do czynienia z jednoimpulsowym obciążeniem ustroju nośnego.

4.3. Mosty mniejsze: $10-12 < l < 20 - 25$ m

Funkcja obciążenia znacznie się wtedy komplikuje. Konieczne staje się bowiem uwzględnienie działania obu osi oraz wpływu drgań podłużnych skrętnych.

W niektórych przypadkach można przyjąć z wystarczającą technicznie dokładnością dwuczłonową funkcję obciążenia typu:

$$P = \eta \left[A + Be^{-at} \sin(\omega \cdot t + \varphi)\right] \sin \frac{\pi v}{l} t \qquad (3)$$

Przypadek ten ma miejsce, gdy dominuje nacisk osi tylnej lub zbliżonych do siebie osi tylnych.

W ogólności jednak funkcja ta ma postać bardziej złożoną:

$$P = P_n(A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2) \qquad (4)$$

gdzie: A_1, A_2, B_1, B_2 są odpowiednio składnikami stałymi i pulsacyjnymi nacisków obu osi, a C_1, C_2 - rozłożonym na dwa składniki wpływem pulsacji skrętnej podłużnej.

Dla pojazdu traktowanego jako układ o dwóch stopniach swobody po wprowadzeniu pewnych uproszczeń i rozpisaniu, szukana funkcja obciążenia ma postać:

$$P_n^d = \eta \sum_n \left\{A_n + e^{-at}\left[B_n \sin(\omega_b t + \varphi_b) + C_n \sin(\omega_c t + \varphi_c)\right]\right\} \sin(\omega t + \varphi_n) \qquad (5)$$

przy czym

$$\text{dla} \begin{cases} n = 1 & 0 \leqslant t \leqslant \frac{l}{v} \\ n = 2 & \frac{d}{v} \leqslant t \leqslant \frac{l+d}{v} \end{cases} \qquad (6)$$

gdzie:

l - rozpiętość przęsła,

d - rozstaw osi pojazdu

4.4. Mosty większe

Wpływ impulsu progowego tutaj maleje i wraz ze wzrostem rozpiętości staje się pomijalny. Stosunek długości pojazdu do rozpiętości jest również tak mały, że umożliwia traktowanie pojazdu jako jednej siły pulsującej.

5. Równanie ruchu środka belki (układ lewej strony równania)

Nie jesteśmy w tej chwili w stanie znaleźć rozwiązania równania dynamiki belki obejmującego wszystkie parametry tj. opisującego zjawisko tak skomplikowane, jakim jest ono w rzeczywistości.

Musimy postępować drogą kolejnych przybliżeń. Najpierw opisujemy zjawisko ogólnie, a potem staramy się opis poszerzyć uwzględniając coraz większą liczbę parametrów.

Oczywiście narażamy się na ryzyko, że wybór nasz nie będzie trafny, że pominiemy czynniki, których wpływ na wynik jest bardziej istotny niż tych parametrów, które zostały uwzględnione.

I brak jest właściwie metody, która stanowiłaby kamień probierczy naszych założeń.

Takiej weryfikacji nie możemy np. szukać w doświadczeniach na obiektach rzeczywistych. Nie jesteśmy bowiem w stanie przyporządkować poszczególnym parametrom układu - skutków, tzn. ustalić ich wpływ na wynik obserwowany w postaci sumarycznego ugięcia, czy naprężenia.

Dlatego też postęp osiągnąć możemy jedynie drogą prób i kolejnych przybliżeń - myląc się niejednokrotnie i powtarzając badania. Nie powinno nas zatem dziwić, że tak wiele nieraz istotnie różniących się między sobą sposobów ujęcia zagadnienia możemy tutaj zaobserwować.

W ogólności, jeśli uznamy za istotne i miarodajne dla oceny pracy dynamicznej belki mostowej - ugięcie środka i jeśli pominiemy znane wyprowadzenie, to lewa strona równania może mieć postać następującą:

$$L = \ddot{W}\,(m_1, m_2, \omega) + \dot{w}(k_1, k_p) + w(c, k_2) \tag{8}$$

gdzie: w tym zapisie:

k_p - współczynnik tłumienia pozornego,

k_1 i k_2 - odpowiednio współczynniki tłumienia materiałowego i tłumienia konstrukcyjnego,

lub przy pominięciu tłumienia pozornego i zmianie formy zapisu:

$$(m_1 + m_2 \sin^2\omega t)\ddot{W} + k_1 \dot{W} + (\pm k_2 + c)W = L \tag{9}$$

Zwrócić tutaj trzeba uwagę na rozdzielenie jednolicie dotychczas przyporządkowanego prędkości wychylenia wpływu tłumienia na dwa czynniki: tłumienie materiałowe i tłumienie konstrukcyjne.

Wobec tego jedna z możliwych (a naszym zdaniem najpełniejsza, a jeszcze możliwa do wyliczenia) forma równania ruchu środka określonej belki rusztu ma postać następującą:

$$\ddot{w}(m_1 + m_2\sin^2\omega t) + k_1\dot{w} + (\pm k_2 + c)w = \eta \sum_n \Big\{(A_n + e^{-at}\big[B_n \cdot$$

$$\cdot \sin(\omega_b t + \varphi_b) + C_n \sin(\omega_c t + \varphi_c)\big]\Big\} \sin(\omega t + \varphi_n) \tag{10}$$

Rozwiązywanie tego równania jest zaprogramowane na maszynie cyfrowej ZAM-2 i wykonywane w Ośrodku Obliczeniowym Prosynchemu w Gliwicach.

6. Wnioski

Na zakończenie chcemy przedstawić pewne wnioski mające dwojaki charakter: wnioski dotyczące referatu i uwagi dotyczące drogi, jaką nam przyjdzie iść, a więc problemów naukowych z dynamiki mostów jakie przed nami stoją i ich roli dla całokształtu sprawy.

6.1. Wnioski z referatu

Z problemów poruszonych w referacie zasługują - naszym zdaniem na powtórzenie - następujące tezy:

a) z wymienionych poprzednio powodów - współczynnik dynamiczny nie może już nas zadowalać,

b) jest możliwe obliczenie dynamiczne i jest możliwe ustalenie danych, a w pierwszym rzędzie zakresów rozpiętości, dla których miarodajne jest obliczenie dynamiczne,
c) istnieje co najmniej jedna wspomniana w referacie droga połączenia obliczenia rusztu z obliczeniem dynamicznym poszczególnej belki. Być może szybko osiągalne jest również bezpośrednie rozwiązanie płyty wzgl. rusztu przy działaniu odpowiadających rzeczywistości obciążeń,
d) możliwe jest uzyskanie linii dynamicznego ugięcia środka określonej belki rusztu nawet przy pomocy wolnych maszyn, takich jak np. ZAM-2 choć zaprzeczyć się nie da, że optymalne zastosowanie znalazłyby tutaj układy hybrydowe.

Oczywiście - autorzy referatu nie stawiali sobie celu podania pełnej, skończonej i zamkniętej metody obliczania dynamicznego. Chodziło nam raczej o schemat, o ustawienie jakiejś realnej perspektywy działania.

6.2. Wnioski ogólne

Wyłania się pytanie, jakie zagadnienia naukowe z zakresu dynamiki mostów powinny być w pierwszej kolejności badane:

1. W dalszym ciągu trzeba analizować i badać doświadczalnie parametry równania (np. tłumienie, wpływ zmienności masy, układ prawej strony itp.),
2. Konieczne jest rozwijanie dynamiki układów płaskich dla obciążeń realnych przy wykorzystaniu współczesnych technik obliczeniowych.
3. Istotne znaczenie ma badanie wpływu obciążeń gąsienicowych.

W mostach kolejowych sytuacja jest pod wieloma względami łatwiejsza, a pod niektórymi trudniejsza.

W pierwszym rzędzie wszelkie recepty wymagają tutaj większej rozwagi, gdyż dynamika to nie tylko problem ekonomiczny, lecz w pierwszym rzędzie problem bezpieczeństwa.

Schemat konstrukcyjny jest tutaj prosty, a obciążenie zlokalizowane i działające bardziej przejrzyście. Ale zupełnie

nic nie wiemy o strukturze i wielkości sił poziomych zwłaszcza przy większych prędkościach i o parametrach wytrzymałościowych obiektów, a zwłaszcza odporności na działanie poziome.

Zbadania wymagają tutaj również parametry nawierzchni i ich wpływ na jazdę.

Konieczne jest również badanie struktury obciążenia dynamicznego dla ustalenia wzorcowych cyklów obciążeniowych miarodajnych dla określenia wytrzymałości zmęczeniowej poszczególnych elementów.

Czyli na zakończenie można by powiedzieć:

1. Jesteśmy w stanie w niedalekiej przyszłości dać może jeszcze niedoskonałą - ale konkretną - metodę obliczenia wolnopodpartych mostów drogowych.
2. Po rozwiązaniu problemu sił poziomych - a więc kilka lat później - również metodę obliczenia dynamicznego mniejszych mostów kolejowych.
3. Nie jesteśmy w stanie - w dającej się przewidzieć przyszłości - dać zadowalającej metody obliczenia dynamicznego mostów większych rozpiętości oraz mostów złożonych konstrukcyjnie.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Резюме

Критика метода динамического коэффициента в проектировании мостов. Указание некоторых возможностей динамического расчета мостов, главным образом, шоссейных.

THE ANALYSIS OF SOME POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF DYNAMICAL COMPUTATIONS IN HIGHWAY BRIDGE DESIGN

S u m m a r y

Criticism of the dynamic coefficient method in the designing of bridges. Pointing at some dynamic possibilities of bridges computation, mainly road bridges.