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

ANATOL JAKOWLUK
Wojskowa Akademia Techniczna

STEFAN ZIEMBA
Zakład Teorii Konstrukcji Maszyn Instytutu
Podstawowych Problemów Techniki PAN

SPOSOBY USTALANIA NAJNIEKORZYSTNIEJSZYCH NADWYŻEK DYNAMICZNYCH W PEWNEJ KLASIE MOSTÓW KOLEJOWYCH

1. Wstęp

Na temat uwzględniania nadwyżek dynamicznych w mostach istnieje obszerna literatura. Krótko charakteryzując osiągnięcia w tej dziedzinie można stwierdzić, że posiadamy jakościowe rozeznanie, lecz ciągle brak ilościowego ujęcia. Dyskusję istniejących prac z tej dziedziny autorzy przedstawili w pracy [1]. Skupimy obecnie swoją uwagę na pewnej ograniczonej klasie kratowych mostów kolejowych średnich i dużych rozpiętości. Chcąc pokusić się o otrzymanie ilościowych wyników przy obliczaniu nadwyżek dynamicznych rozpatrywanej klasy mostów, należałoby uwzględnić cały wachlarz zmiennych parametrów. Omówimy niektóre z czynników komplikujących rozpatrywany model.

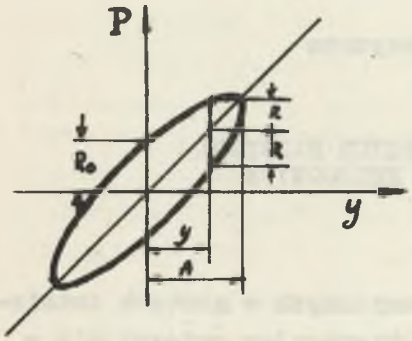
1) Należy budować model o co najmniej kilku stopniach swobody, gdyż dla tych rozpiętości przęseł pojazdy mogą osiągnąć drugą, a nawet trzecią prędkość krytyczną.

2) Należy uwzględnić zarówno masę przęsła jak i masę pociągu, gdyż obie masy są tego samego rzędu, przy czym masę pociągu należy traktować jako zmienną w czasie (wjazd pociągu na most). Ten ostatni fakt jest korzystny dla pracy mostu, gdyż ze zmianą masy na moście następuje ciągła zmiana częstości drgań własnych przęsła, co przy zaistnieniu rezonansu powoduje, że belka szybko wychodzi z tego niebezpiecznego stanu.

3) Należy uwzględnić uresorowanie pojazdu.

4) Należy uwzględnić tłumienie. Sprawa ujęcia intensywności tłumienia drgań w rzeczywistości jest bardziej złożona niż w

przypadku liniowego układu o jednym stopniu swobody, kiedy za miarę intensywności tłumienia zazwyczaj przyjmujemy logarytmiczny dekrement. Przy tym ten parametr traktuje się jako wartość stałą. Wiemy jednak dobrze, że nie jest to stała materiałowa. Jak wiadomo istnieje cały szereg odmiennych hipotez. J.G. Panowko [2] dla konstrukcyjnych materiałów przyjmując eliptyczny kształt pętli histerezy (rys. 1), podał następujący wzór na siłę niesprężystego oporu



Rys. 1

$$R = \pm aA^n \sqrt{1 - \left(\frac{y}{A}\right)^2}$$

gdzie: A - amplituda drgań, a i n - stałe materiałowe.

W.W. Bołotin [3] proponuje siłę niesprężystego oporu przyjmować w następującej postaci

$$\frac{R}{M} = 2\left(\varepsilon + \varepsilon_1 y^2 + \varepsilon_2 y^4 + \ldots\right)\frac{dy}{dt}$$

Również nasze własne badania nad logarytmicznym dekrementem tłumienia mostów kolejowych wykazały, że jego wartość nie jest stała, lecz silnie rośnie ze wzrostem amplitud. Reasumując należy stwierdzić, że nie ma dotychczas jednolitego poglądu co do sposobu ujmowania intensywności tłumienia drgań w konstrukcjach. Dlatego też uwzględnienie siły oporu według którejkolwiek z hipotez zawsze będzie tylko pewnym przybliżeniem.

5) Należy uwzględnić działanie nierówności torów w postaci: falistego zużycia szyn, styków szyn, nieosiowości ułożenia torów oraz zużycia obręczy w postaci elipsowatości i płaskich starć: poza tym uwzględnić trzeba wpływ twardych progów przyczółkowych przy wjeździe na przęsło oraz wężykowanie zestawów pojazdów.

6) Należy, co według naszego zdania najistotniejsze, wyznaczać nadwyżki dynamiczne nie dla całego przęsła jako belki mo-

nolitycznej w zadanym przekroju (co jest częściowo uzasadnione dla przęseł małej rozpiętości), lecz dla poszczególnych prętów dźwigarów głównych.

Dotychczasowe rozwiązania uwzględniające dynamiczny charakter pracy mostu sprowadzają się na ogół do wyznaczenia dynamicznego ugięcia $y(x,t)$ przęsła, skąd wylicza się naprężenie. Takie podejście jest podyktowane względnie prostym rachunkiem.

J.J. Kaziej w pracy [4] porównuje nadwyżki dynamiczne wyliczone z ugięć przęsła z nadwyżkami wyliczonymi od sił powstających w elementach dźwigara kratowego przęsła. Przy obliczaniu nadwyżki dynamicznej z ugięcia przęsła obciążał siłami bezwładności linię wpływową ugięcia drgającego przęsła, w postaci jej dolnej obwiedni, otrzymanej dla prędkości krytycznej. Nadwyżki dynamiczne w prętach dźwigara uzyskiwał wychodząc z naprężeń średnich, otrzymanych z obciążenia siłami bezwładności linii wpływu tych prętów. Przytoczmy dwa najważniejsze wnioski wynikające z tych obliczeń:

a) Bezwzględna wartość największej nadwyżki dynamicznej wyliczonej z sił w głównych elementach dźwigarów kratowych może różnić się od bezwzględnej wartości nadwyżki dynamicznej wyliczonej z ugięć w środku rozpiętości nie więcej niż o $\pm$ 6%. Wartość tej różnicy zależy od kształtu linii wpływowej ugięcia w środku rozpiętości,

b) Nadwyżki dynamiczne dla głównych elementów dźwigarów kratowych posiadających linie wpływowe różnych znaków (krzyżulce), będą mniejsze od nadwyżek dynamicznych, obliczonych z ugięć w środku rozpiętości przy częściowym obciążeniu przęsła obciążeniem ruchomym.

Wnioski z przedstawionej metody określania nadwyżek dynamicznych dla elementów kratowego dźwigara głównego wskazują na fakt, że nie różnią się one w zasadzie od nadwyżki dynamicznej otrzymanej z ugięć przęsła.

Jak należy ustosunkować się do tego rodzaju prac? Ze zrozumieniem ze względu na arcytrudny problem i krytycznie jeśli chodzi o uzyskane wyniki. Na obecnym etapie, kiedy już mamy do-

stateczne rozeznanie jakościowe, miarą przydatności rozwiązań teoretycznych winna być zgodność uzyskanych wyników z danymi doświadczalnymi.

Na podstawie własnych badań doświadczalnych przeprowadzonych na szeregu mostach [5, 6] możemy stwierdzić, że nadwyżki dynamiczne uzyskane z ugięć dynamicznych przęseł, przy prędkościach krytycznych pojazdów próbnych są zawsze mniejsze od nadwyżek dynamicznych uzyskanych z odkształceń (naprężeń) krawędziowych, pomierzonych na prętach dźwigara głównego przy prędkościach krytycznych dla tych prętów. Co więcej, mniejsze są niekiedy kilkakrotnie.

Wydaje się, że najbardziej niezawodną drogą do ustalenia miarodajnych nadwyżek dynamicznych w tej klasie mostów jest droga doświadczalna.

2. Wyniki badań doświadczalnych

Przykładowo przytaczamy niektóre wyniki badań nad nadwyżkami dynamicznymi na dwóch przęsłach kratowych, z jazdą dołem, o rozpiętości I. l = 43,20 m oraz II. l = 66,0 m.

I. l = 43,20 m, pociąg próbny złożony z dwóch parowozów Ty51.

Na rys. 2 przedstawiono zmienność współczynnika dynamicznego φ otrzymanego z ugięć przęsła w zależności od prędkości pociągu próbnego.

Z rysunku 2 widać, że prędkość krytyczna pociągu próbnego dla przęsła jako całości wynosi 50 km/godz.

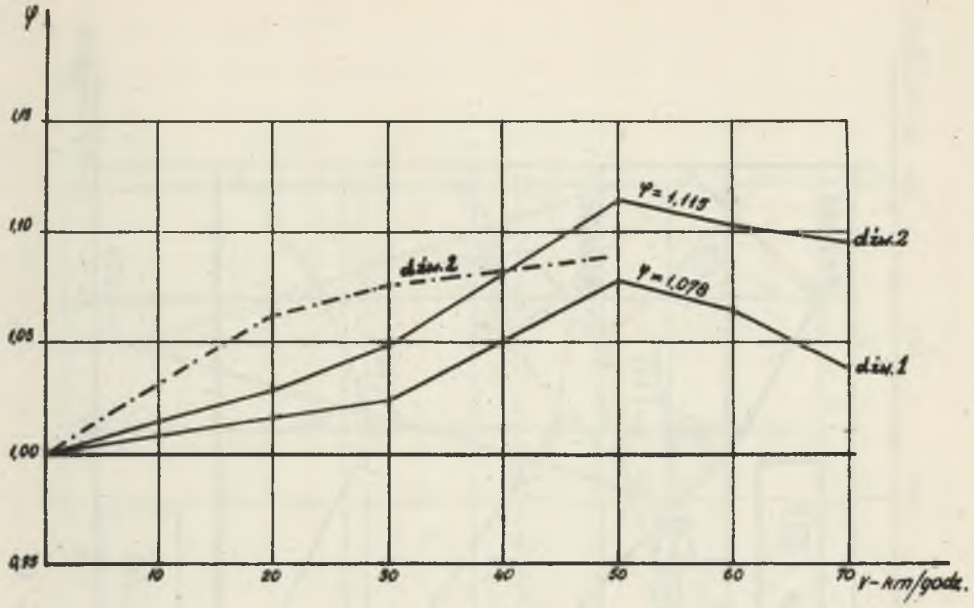
Na rys. 3, 4, 5, 6 przedstawiono wykresy współczynnika φ wyznaczonego z odkształceń, kolejno dla pasa dolnego, pasa górnego, ramy oporowej i krzyżulca.

Z rysunków tych wynika, że prędkość krytyczna dla tych prętów wynosi około 60 km/godz, a więc jest wyższa niż dla całego przęsła.

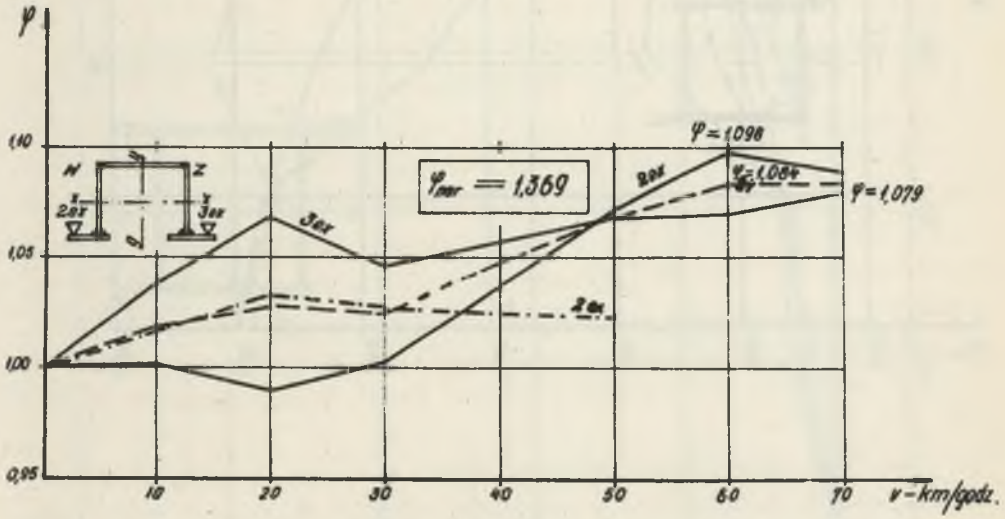
II. l = 66,0 m, pociąg próbny złożony z dwóch parowozów Pt47.

Na rys. 7 przedstawiono zmienność współczynnika φ wyznaczonego z ugięć przęsła.

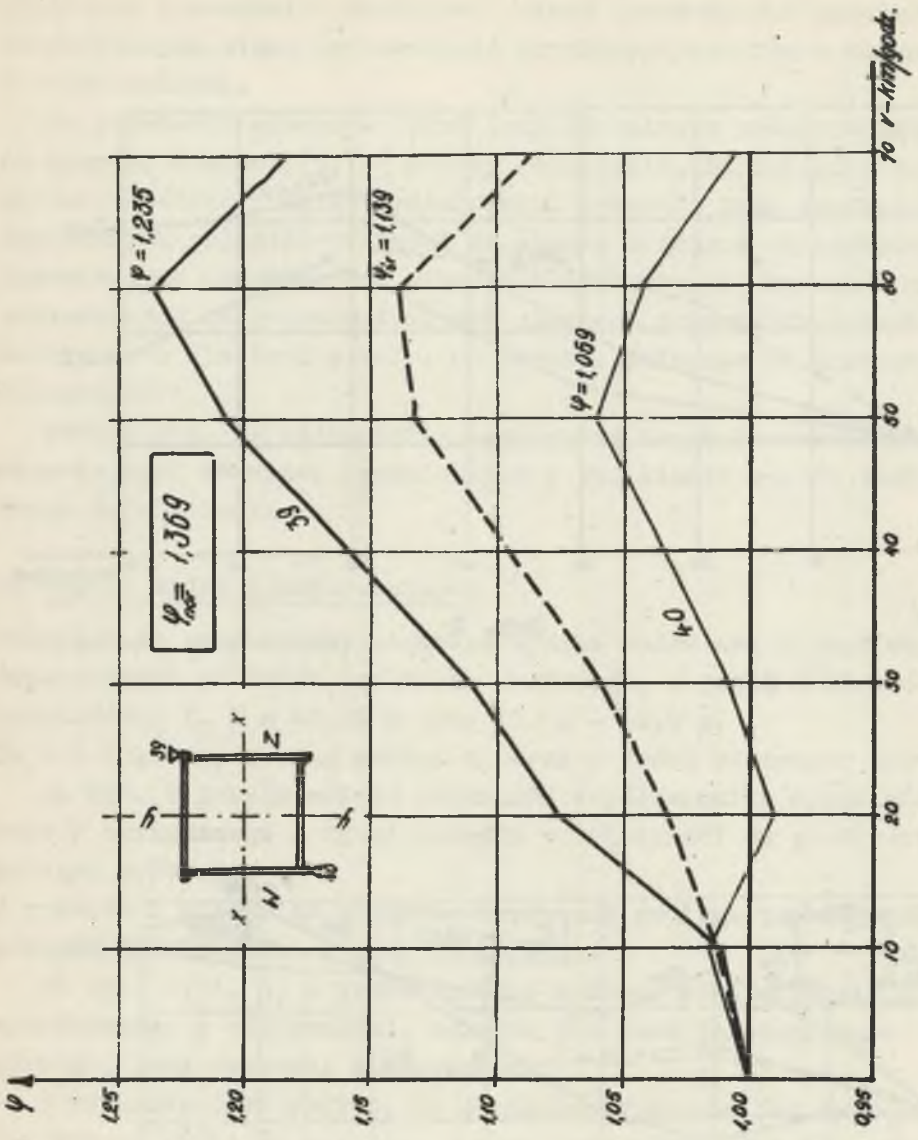
Z rys. 7 widać, że nadwyżki dynamiczne wyznaczone z ugięć przęsła są znikome, sięgające kilku procent.


φ
1,15
1,10
1,05
1,00
0,95
10
20
30
40
50
60
70
v-km/godz.
φ=1,115
φ=1,078
div.2
div.2
div.1

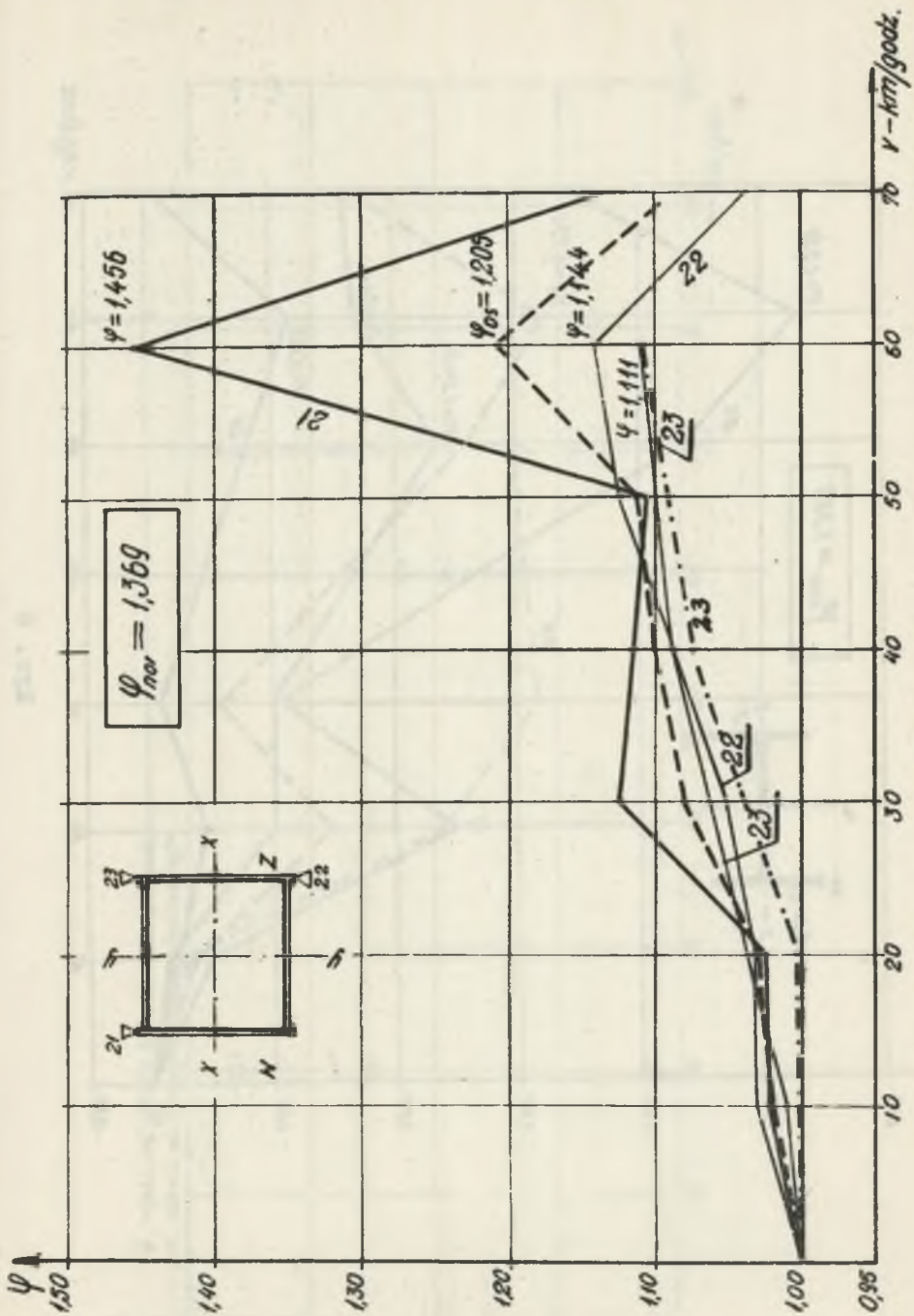
Rys. 2


φ
1,10
1,05
1,00
0,95
10
20
30
40
50
60
70
v-km/godz.
φmax = 1,369
φ=1,098
φ=1,084
φ=1,079
3ex
2ex
2ex
2ex

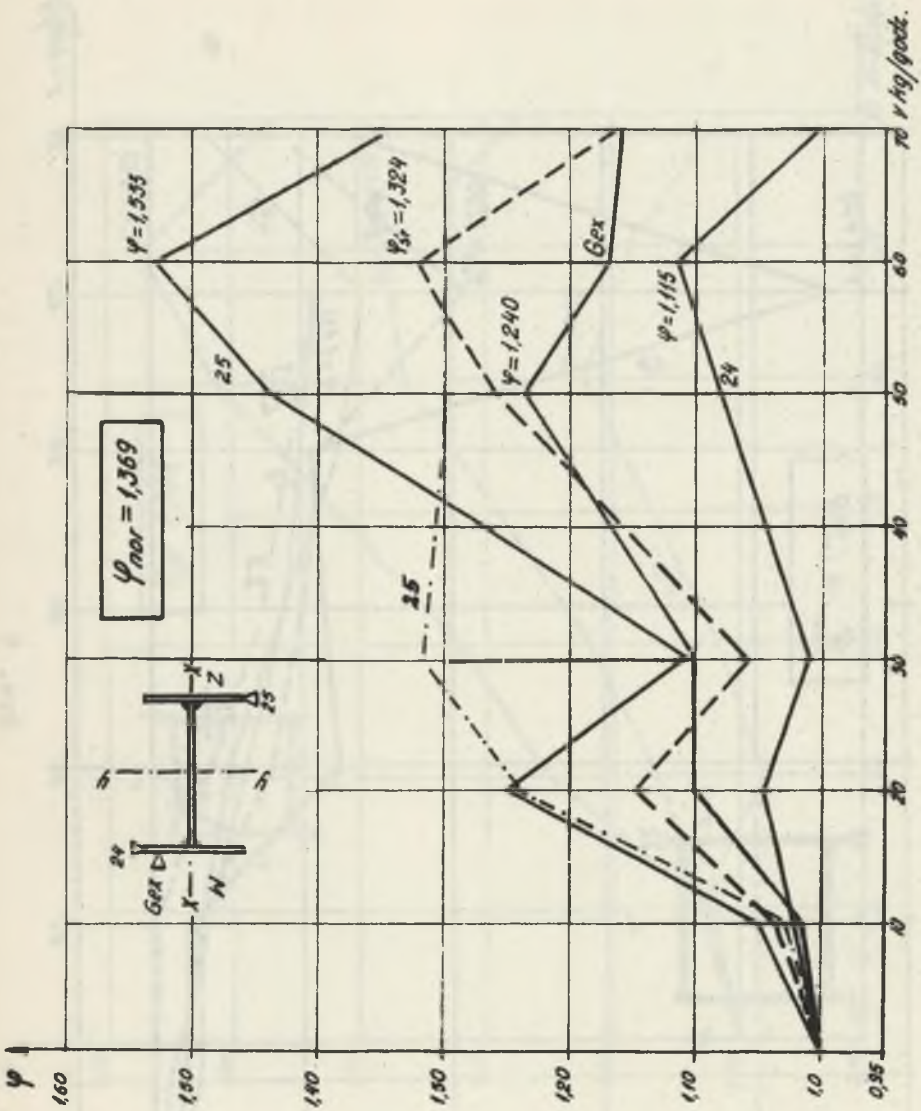
Rys. 3


φ
1,25
1,20
1,15
1,10
1,05
1,00
0,95
10
20
30
40
50
60
70
r-krzyżowat.
φ=1,235
φ=1,139
φ=1,059
φ=1,369
39
40
x
y
z

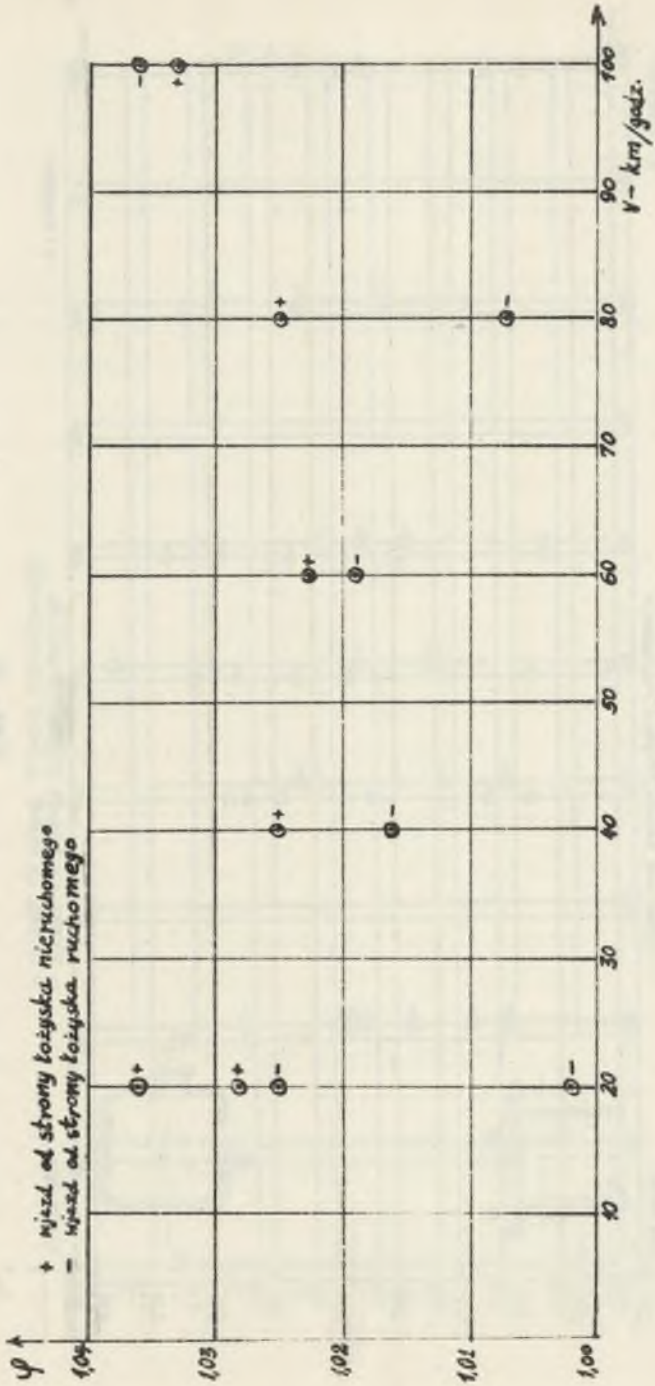
Rys. 4


φ
1,50
1,40
1,30
1,20
1,10
1,00
0,95
10
20
30
40
50
60
70
v – km/godz.
φ=1,456
φ_os=1,205
φ=1,144
φ=1,111
φ_max=1,369
21
22
23
x
z
y

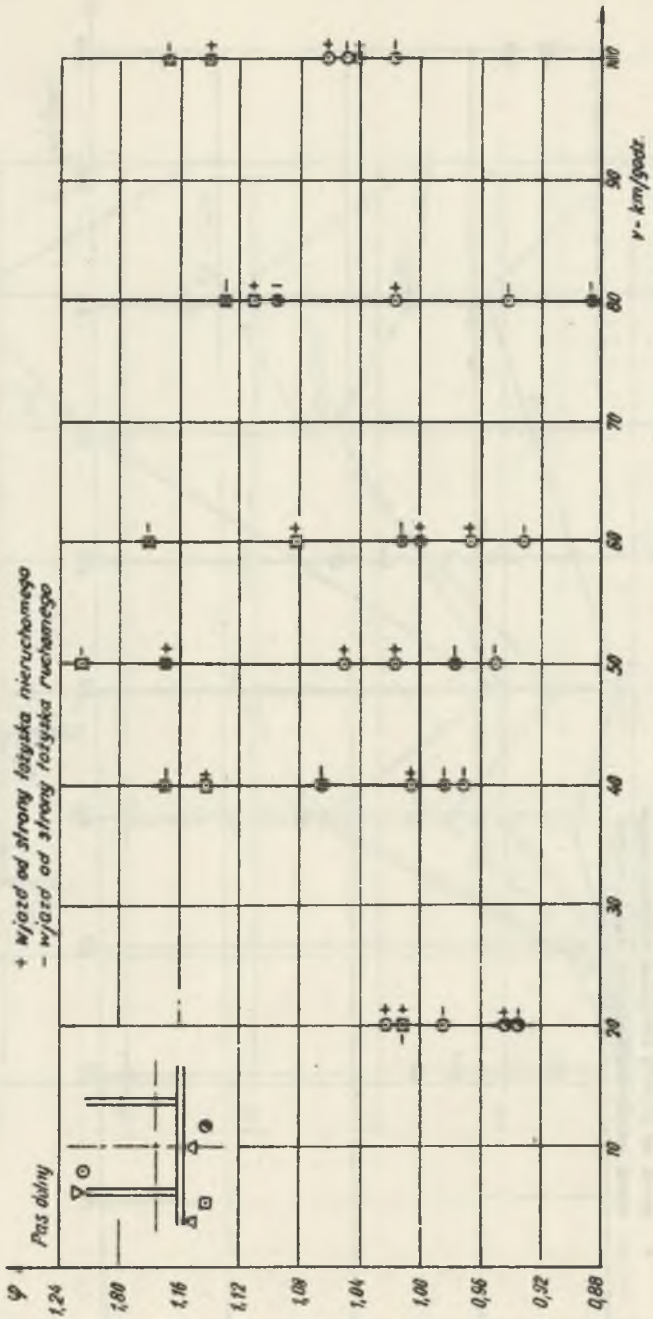
Rys. 5


φ
1,60
1,50
1,40
1,30
1,20
1,10
1,0
0,95
10
20
30
40
50
60
70
v kg/godz.
φnor = 1,369
φ = 1,535
φ = 1,324
φ = 1,240
φ = 1,115
25
24
Gex
Z
N
X
y

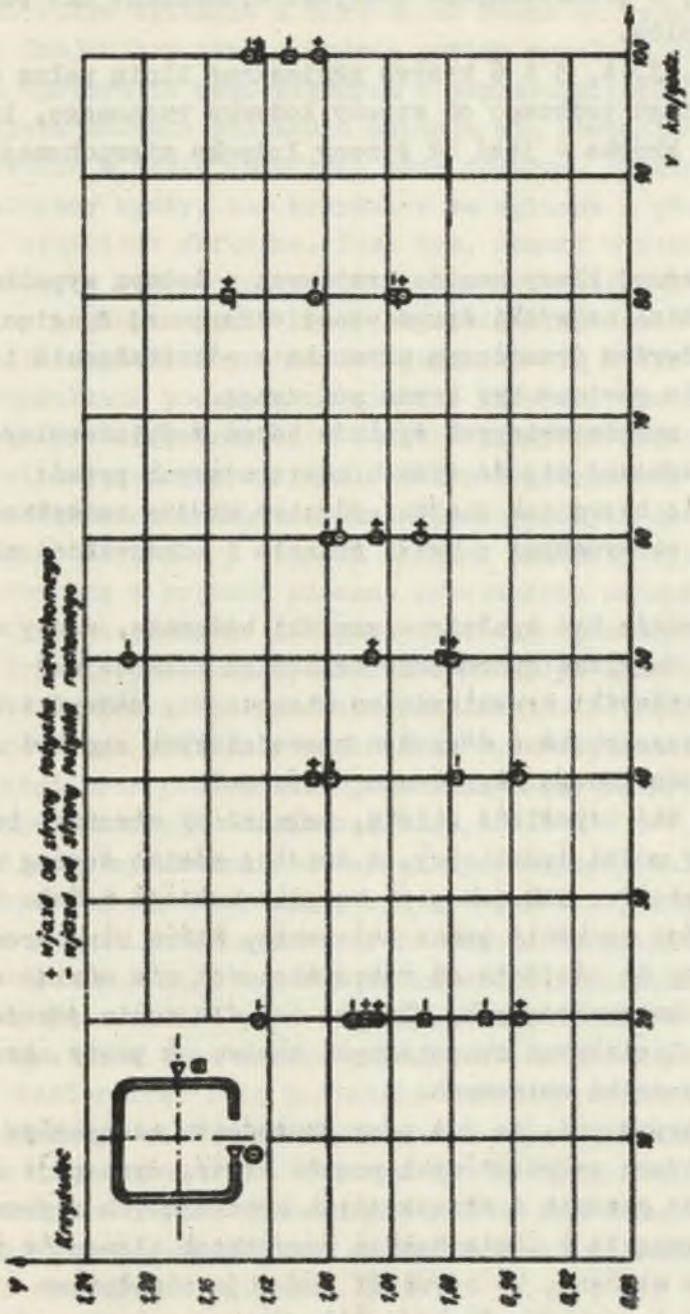
Rys. 6


φ
+ wizd. od strony łożyska nieruchomego
− wizd. od strony łożyska ruchomego
1,04
1,03
1,02
1,01
1,00
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
V – km/godz.

Rys. 7


φ
1,24
1,20
1,16
1,12
1,08
1,04
1,00
0,96
0,92
0,88
Pas doliny
+ wjazd od strony łożyska nieruchomego
- wjazd od strony łożyska ruchomego
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
v - km/godz.

Rys. 8


Krzywiznc
+ wjazd od strony nabytku nieruchomego
- wjazd od strony nabytku ruchomego
v km/godz.

Rys. 9

Na rys. 8, 9 przedstawiono nadwyżki dynamiczne dla pasa dolnego i krzyżulca.

Na rys. 2, 3, 4, 5 i 6 krzywe naniesione linią pełną dotyczą jazd pociągu próbnego od strony łożyska ruchomego, linią zaś kreska - kropka - jazd od strony łożyska nieruchomego.

3. Wnioski

Dla rozpatrywanej klasy mostów kratowych w żadnym wypadku nie można utożsamiać nadwyżki dynamicznej otrzymanej z ugięcia przęsła z nadwyżką dynamiczną uzyskaną z odkształcenia i tylko ta ostatnia powinna być brana pod uwagę.

W świetle przedstawionych wyników badań doświadczalnych należy ustosunkować się do trzech następujących pytań:

1) Skąd się biorą tak znaczne różnice między nadwyżkami dynamicznymi otrzymanymi z ugięć przęsła i odkształceń elementów przęsła?

2) Jakie muszą być spełnione warunki badawcze, ażeby uzyskane wyniki na nadwyżki dynamiczne uważać za miarodajne?

3) Które nadwyżki dynamiczne są miarodajne, nadwyżki uzyskane dla danego pręta z naprężeń krawędziowych czy też uzyskane ze sprowadzonego naprężenia osiowego?

Ad 1) Aby dać odpowiedź ścisłą, należałoby stworzyć bardzo skomplikowany model dynamiczny, a ściślej mówiąc szereg modeli dla różnych prętów. Tak jak przy budowie każdego modelu tak i tu musielibyśmy poczynić pewne założenia, które nieuchronnie doprowadziłyby do odejścia od rzeczywistości nie mówiąc o trudnościach matematycznych. Dlatego też dla dania jakościowego obrazu oddziaływań dynamicznych taboru na pręty ograniczmy się do wyjaśnień opisowych.

Wypada przypomnieć, że już przy obciążeniu statycznym przęsła w przekrojach przywęzłowych prętów kraty, występuje silny wpływ momentów gnących i skręcających wynikających z przestrzenności przęsła i utwierdzenia wszystkich elementów schodzących się w węzłach, Te czynniki powodują odstępstwa w granicach 10-20% w stosunku do naprężeń obliczanych dla schematu teoretycznego (pręty w węzłach połączone przegubowo) [7]. Skąd

pochodzi wpływ zginania i skręcania? Można to wyjaśnić następująco. Znajdujący się na moście pociąg wywołuje zginanie podłużnic sprężyście utwierdzonych w poprzecznicach, te z kolei pod wpływem nacisku podłużnic uginają się powodując przez swe utwierdzenie w węźle skręcanie pasa dolnego, zginanie słupków z płaszczyzny kraty, zaś krzyżulce są zginane z płaszczyzny kraty i częściowo skręcane. Poza tym, moment utwierdzający podłużnicę, z poprzecznicy przechodzi na węzeł jako moment zginający w płaszczyznie kraty, wywołując zginanie w tej płaszczyźnie wszystkich prętów zbiegających się w tym węźle.

W krzyżulcach powstają największe nadwyżki dynamiczne. Rozpatrywany przekrój krzyżulca będzie wykonywał drgania wymuszone odpowiadające czterem współrzędnym uogólnionym: przesunięciom w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych do osi pręta, w kierunku osi pręta i drgania skrętne pręta. W wyniku tych drgań powstają w prętach znaczne krawędziowe nadwyżki dynamiczne. Każdy pręt głównego dźwigara kratowego posiada swoje częstości drgań poprzecznych, na które ma wpływ siła osiowa. Częstości te w ogólnym przypadku różnią się od częstości drgań własnych całego przęsła. Wynika stąd wniosek, że dla przęsła i poszczególnych prętów inne prędkości jazdy są krytyczne (co zostało potwierdzone doświadczeniem).

Ad 2) Przy wyznaczaniu nadwyżek dynamicznych należy stosować najcięższe pojazdy znajdujące się w eksploatacji, gdyż one decydują o wytężeniu konstrukcji. Do zbioru rozpatrywanych nadwyżek dynamicznych mogą być wzięte nadwyżki wyznaczone dla prędkości krytycznych dla poszczególnych elementów. Nadwyżki dynamiczne nawet dla tego samego pojazdu i tej samej prędkości krytycznej każdorazowo będą posiadały inne wartości co jest wynikiem ingerencji wielu zmiennych parametrów wpływających na przebieg drgań elementów. Dlatego też do wyznaczenia miarodajnej wartości nadwyżki dynamicznej należy zastosować statystyczne podejście, wyznaczając tę wartość ze zbioru nadwyżek dynamicznych otrzymanych z badań.

Ad 3) Oczywistym jest, że do wyznaczenia miarodajnej nadwyżki dynamicznej dla danego elementu należy posługiwać się

nadwyżkami dynamicznymi uzyskanymi z naprężeń krawędziowych a nie średnich, gdyż o wytężeniu punktu decyduje nie naprężenie średnie lecz naprężenie rzeczywiste w danym punkcie.
To pociąga za sobą konieczność takiego rozmieszczenia i takiej liczby tensometrów, aby móo wychwycić przy pomiarze maksymalne naprężenia.

LITERATURA

[1] Jakowluk A. i Ziemba S.: Współczesne kierunki dynamicznych badań mostów. Przegląd Kolejowy, Nr 12, 1960 r.

[2] Panowko J.G.: Ob ucziotie gistieriezisnych potier w zadacziach prikładnoj tieorii uprugich kolebanij. Żurnał Tiechn. Fiziki AN SSSR, t. XXIII, wyp. 3, 1953.

[3] Bołotin W.W.: Dinamiczieskaja ustojcziwost uprugich sistiem Gosizdat, 1956.

[4] Kaziej I.I.: Dinamiczieskij rascziot prolotnych strojenij żieleznodorożnych mostow, 1960.

[5] Jakowluk A. i Ziemba S.: Wyniki badań dynamicznych kolejowego mostu spawano-nitowanego o ustroju kratowym o rozpiętości l = 43,20 m. Przegląd Kolejowy, Nr 3, 1961.

[6] Jakowluk A.: Badanie pracy spawano-nitowanego przęsła o rozpiętości l = 66,0 m pod dynamicznym oddziaływaniem kolejowych obciążeń. COBiRTK, OSŻD Temat V-26a - 1/60, R.T, p.2.

[7] Lesochin B.F. i inni: Mietaliczieskije mosty. Moskwa 1959 r.

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЙБОЛЕЕ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК В НЕКОТОРОМ КЛАССЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖЕНЫХ МОСТОВ

Р е з ю м е

Работа содержит критический анализ метода расчета динамических надбавок в мостах со сквозными фермами из их изгиба. Анализ подтверждается результатами экспериментальных исследований.

METHODS OF DETERMINATION OF MOST UNFAVORABLE DYNAMICAL SURPLUS IN A CERTAIN CLASS OF RAILWAY BRIDGES

S u m m a r y

The paper contains a critical analysis of a computation method of dynamic surpluses in truss bridges from their deflections. The analysis is supported by means of experimental research results.