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

ROMAN CIESIELSKI, ANDRZEJ GUMIŃSKI
MIECZYSŁAW PIERONEK
Katedra Dynamiki Budowli
Politechniki Krakowskiej

DOŚWIADCZENIA Z BADAŃ DYNAMICZNYCH MOSTÓW

1. Wstęp

Badania dynamiczne nie wchodziły dotąd w zakres obowiązkowych badań odbiorczych mostów. Dlatego prowadzono je w ramach badań naukowych, jeśli były to badania doraźne związane z odbiorem lub sprawdzeniem mostu - przeważnie z inicjatywy jednostki wykonującej pomiary. Badania dynamiczne stanowią wtedy uzupełnienie badań statyczno-wytrzymałościowych. W przyszłości porządek ten na pewno ulegnie zmianie, ale jak dotąd prawie wszystkie badania dynamiczne mostów prowadzone w Katedrze Dynamiki Budowli Pol. Krak. wykonywano przy okazji odbiorów lub sprawdzeń mostów. Stąd w niniejszym opracowaniu, w którym pragniemy podać kilka doświadczeń z badań mostów jest prawie przypadkowy dobór tematyki.

Badano kilkanaście żelbetowych płytowych mostów drogowych o rozpiętościach 8 do 18 m, ale z większą chęcią podejmowano się badań mostów o obciążeniach lub konstrukcji nietypowej. Tak więc badano mosty drogowe stalowe, kratowe, przegubowe, przy obciążeniach drogowych (plus tramwaje), mosty drogowe stalowe skrzynkowe jedno i wieloprzęsłowe, most stalowy dla kolejki wózków z wlewkami hutniczymi i mosty stalowe kopalniane dla kolei "piaskowej". Dla tego rodzaju mostów trzeba było dobrać oddzielne kryterium przydatności do eksploatacji oraz dostosować badania do rodzaju obciążeń i możliwości eksploatacyjnych. Poniżej podano kilka spostrzeżeń, które uznano za charakterystyczne lub ciekawe.

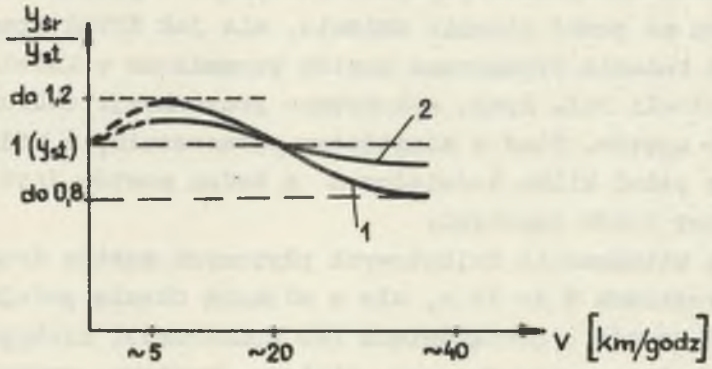
Opracowanie nie ma aspiracji do wyczerpania tematu, ani całkowitej pewności wniosków. Niektóre z nich powinny być po-

twierdzone dalszymi badaniami. Omówiono kolejno spostrzeżenia dotyczące wielkości pomierzonych drgań, tłumienia ogólnego i dokładności stosowanej aparatury pomiarowej. Ta ostatnia sprawa wydaje się ważna, a kontynuacja badań jest tu szczególnie celowa. W badaniach, z których czerpano poniżej podane wnioski stosowano aparaturę do pomiaru bezpośredniego amplitud drgań typu mechanicznego, jak ugięciomierze z rejestracją, wibrografy Geigera (z masą sejsmiczną), tensometrię dynamiczną elektrooporową i mechaniczną oraz aparaturę optyczną.

2. Ciekawe spostrzeżenia pomiarowe

2.1. Powtarzające się cechy przy badaniu mostów żelbetowych płytowych l = 8 do 18 m.

Zauważono powtarzającą się, ciekawą zależność pomiędzy amplitudami drgań a prędkością przejazdu przedstawioną na rys. 1

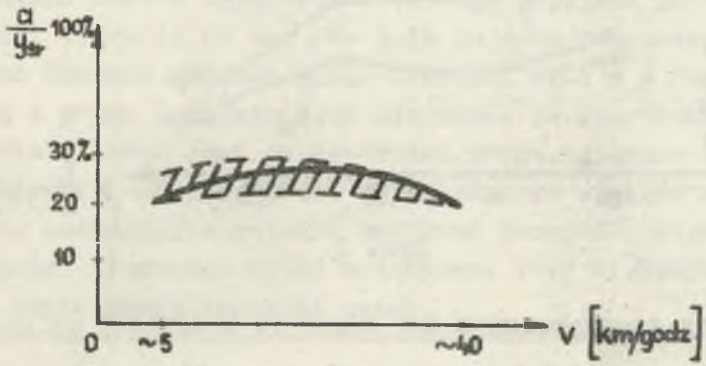


Rys. 1

(obciążenie: samochód ciężarowy Star 7 T). Mianowicie ze wzrostem prędkości następował spadek średniej wielkości ugięć. Kształt krzywej $\frac{Y_{śr}}{Y_{st}}$ zależny był od rozpiętości mostu (czym rozpiętość większa tym krzywa "2") bardziej płaska i od jego sztywności (czym bardziej sztywny tym krzywa "1" bardziej wypukła) oraz od rodzaju nawierzchni.

Obciążenia przy prędkościach w zakresie 5 do 10 km/godz. dawały większe ugięcia średnie niż obciążenia przy większych

prędkościach, które malały w granicach maksymalnych nawet o 20% w stosunku do obciążenia statycznego (przy małych rozpiętościach mostów). Zjawisko to może być wytłumaczone teoretycznie. Należy zaznaczyć, że w badaniach brano pod uwagę mosty o "gładkim wjeździe" w zakresie prędkości od 5 do 40 km/godz i pomiary dotyczyły punktów środkowych wolnopodpartych przęseł mostu.

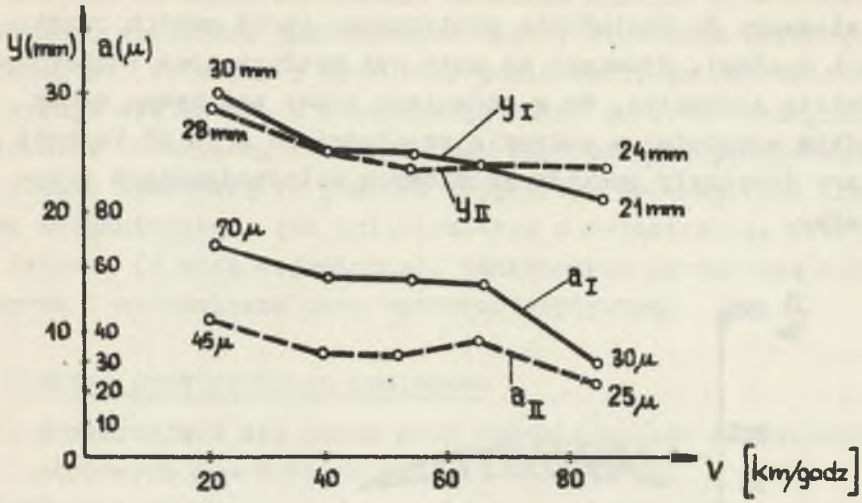


Rys. 2

Inaczej przebiegał wzrost amplitudy drgań przy przejeździe z rosnącymi prędkościami (rys. 2). Amplitudy drgań zwiększały się wraz z prędkością przejazdu do ok. 30 km/godz, a następnie z reguły malały. W tym przypadku jednak prawidłowość nie była tak silna jak w poprzednim.

Na rys. 3 podano wyniki pomiaru dwóch sąsiednich przęseł (I i II) mostu żelbetowego, płytowego l = 15 m. Charakterystyczne dlatego, że przęsło II było naprawiane ze względu na pewne błędy wykonawcze. Przy prawie identycznych ugięciach, pod tym samym obciążeniem amplitudy drgań różniły się znacznie.

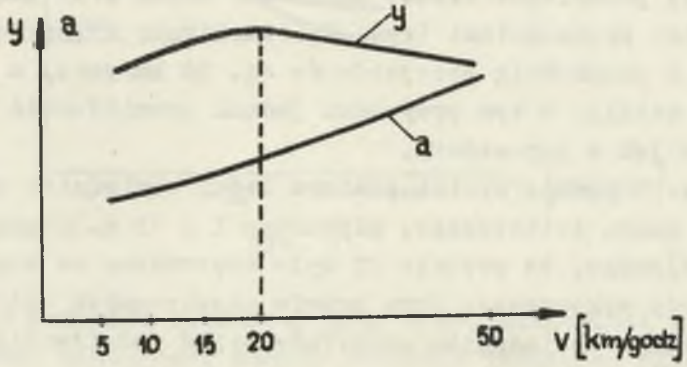
Przęsło I miało lepszy beton (rzędu R_w = 250-300 kG/cm^2) w stosunku do R_w = 170 kG/cm^2 przęsła II co mogło wpłynąć na wyniki.



Rys. 3

2.2. Zmiany stosunku amplitud drgań do wielkości ugięć

Na wykresie rys. 4 pokazano przykład przebiegu zmian ugięć i amplitud drgań dla mostu stalowego belkowego jednoprzęsłowego.



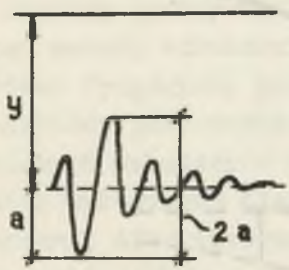
Rys. 4

Ze wzrostem prędkości widać nieznaczną tendencję do ustabilizowania względnie pomniejszenia wielkości ugięć natomiast wzrost amplitudy drgań. Wniosek ten dotyczy bardziej przekro-

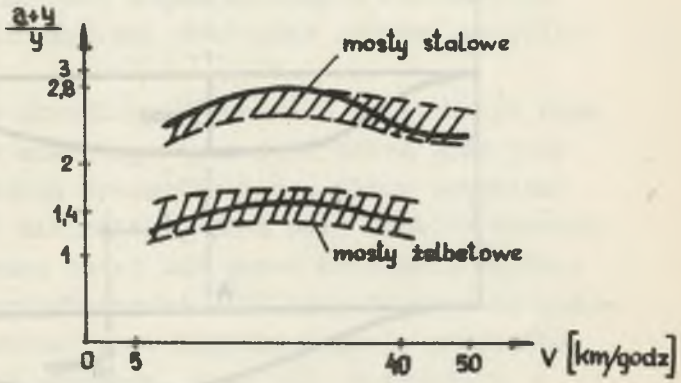
jów w 1/4 rozpiętości i jeszcze bliżej podpory. Jakościowe jest to zjawisko potwierdzone wieloma badaniami. Ilościowo przebiega jednak z dość dużymi rozrzutami.

2.3. Wyniki pomiarów przy przejeździe przez próg

Jednym z najprostszych sposobów wzbudzenia drgań jest przejazd pojazdu przez sztucznie wytworzoną na moście nierówność. W badaniach mostów drogowych stosowano przejazd przez próg o wysokości 15 cm do 20 cm. Oba koła pojazdu jednocześnie wjeżdżają na łagodny podjazd progu długości do 1 m a następnie zeskakują z progu działając jak uderzenie na konstrukcję. Energia uderzania zależna jest od wysokości progu, ciężaru zeskakującej osi a także od prędkości przejazdu. Ze względu na możliwość ew. uszkodzenia pojazdu prędkość przejazdu większą od 20 km/godz stosowano tylko wyjątkowo. Przy większych prędkościach zmniejszano wysokość progu.



Rys. 5



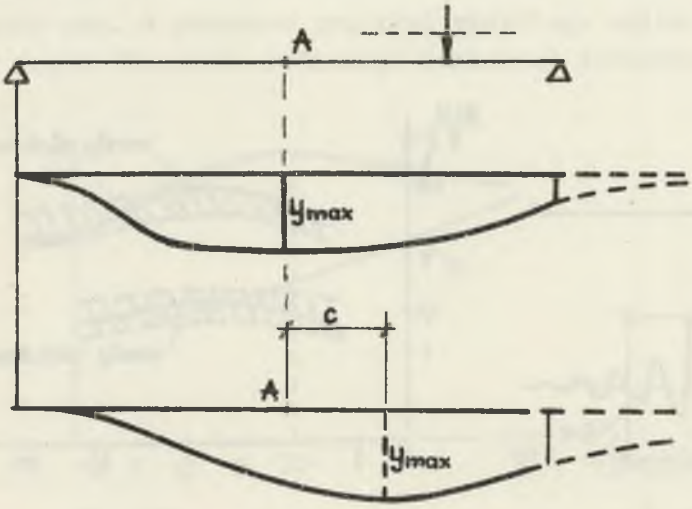
Rys. 6

Przy przejazdach tramwajów ustawiano na szynach kliny stalowe o wys. 20 mm. Próg ustawiono w środku rozpiętości lub w określonych miejscach mostu. Rejestracja drgań wywołanych przejazdem przez próg pozwala tak na ocenę zwiększania się

ugięć mostu i jego sztywności jak przede wszystkim na rozeznanie ogólnych właściwości tłumienia i przekazywania drgań przez konstrukcję. Na rys. 5 pokazano przykładowy zapis oscylografu przy przejeździe przez próg a na rys. 6 zakresy przyrostu wielkości ugięć $\frac{a+y}{y}$ w zależności od prędkości przejazdu V; obciążenie: samochód ciężarowy Star 7 T. Wartości te są prawie dwukrotnie większe (do 2,8) dla mostów stalowych, w stosunku do wartości dla mostów żelbetowych (do 1,4). Istnieje - chociaż niezbyt wyraźna-tendencja do osiągania wartości maksymalnych przy prędkościach przejazdu ok. 25 km/godz. Wyniki badań tłumienia podano w p. 3.

2.4. Linie wpływu ugięć mostów przy obciążeniu ruchomym

Jako ciekawe spostrzeżenie z pomiarów potwierdzające wyniki rozważań teoretycznych można podać przesunięcie się położenia



Rys. 7

wartości maksymalnych ugięć (łącznie z amplitudą drgań) przy różnych prędkościach przejazdu (rys. 7). Przy prędkościach $V < 15$ km/godz maksymalne ugięcie w badanym punkcie A (środek

rozpiętości belki jednoprzęsłowej) występuje przy położeniu obciążenia ponad badanym punktem, przy prędkościach V > 25 km/sek maksymalne ugięcie występuje przy położeniu obciążenia poza badanym punktem (po przejeździe). Długość odcinka c jest różna i zwiększa się z prędkością przejazdu. Charakterystyczne są wartości końcowe linii wpływu przy położeniu ciężaru nad skrajną podporą w obu przypadkach. W pierwszym jest to prawie tylko amplituda drgań całego mostu, w drugim jeszcze dość znaczne ugięcie. Proporcje podane na rys. 7 dotyczą drogowego mostu stalowego skrzynkowego.

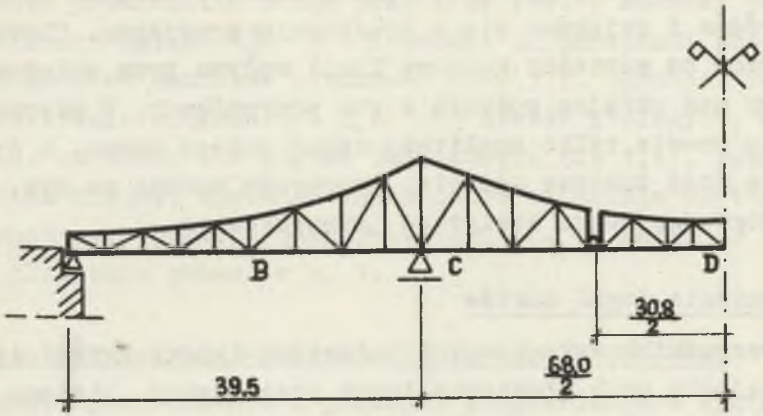
3. Tłumienie drgań mostów

Przy wszystkich wykonywanych badaniach dynamicznych czyniono próby ujęcia cech tłumienia drgań przez mosty. Wiadomo, że najważniejszymi czynnikami ogólnego tłumienia są rodzaj materiału (tłumienie materiałowe) i typ konstrukcji (tłumienie konstrukcyjne). Bardzo interesujące byłoby oddzielne uchwycenie tych wartości. Nie jest to jednak możliwe przy badaniach doraźnych. Celowe będzie chyba podanie kilku przykładowych, uzyskanych z pomiaru, wartości logarytmicznych dekrementów tłumienia, mimo iż są to wartości obarczone różnymi przybliżeniami.

Pomiary wykonywano w określonych punktach konstrukcji stosując metodę wzbudzenia udarowego (przejazd przez próg przy mostach drogowych, przejazd tramwajów przez kliny ustawione na szynach przy mostach miejskich), oraz przy lekkich mostach stalowych wzbudzenie przez ludzi lub nawet działanie wiatru. Pomiar wykonywano dla przemieszczeń albo bezpośrednio ugięciomierzami, albo instrumentami typu sejsmicznego (w przypadku wyższych częstości drgań własnych) oraz dla odkształceń ε przy pomocy czujników elektrooporowych. Zarejestrowane na oscylogramie przemieszczenia opracowywano obliczając logarytmiczne dekrementy tłumienia z wzoru

$$\delta = \frac{1}{n} (\ln A_o - \ln A_n)$$

gdzie: A_o i A_n są wielkościami początkowej i końcowej mierzonej amplitudy drgań, n jest liczbą okresów drgań pomiędzy amplitudą A_o a A_n zwykle 3 do 10.



Rys. 8

Dla mostów płytowych, żelbetowych otrzymywano wartości δ w granicach od 0,10 do 0,30. Szczególnie interesujące były jednak wartości dla mostów stalowych. Na rys. 8 pokazano schemat trójprzęsłowego mostu kratowego. Logarytmiczne dekrementy tłumienia drgań mierzone z ugięć w punktach B, C, D tak przy przejeździe samochodu przez próg jak i tramwaju przez kliny wynosiły od 0,04 do 0,06.

Wyższe wartości otrzymano na podporze (punkt C). Częstość drgań własnych pionowych mostu wynosiła ok. 112/min (ok. 2 Hz). Natomiast wartości δ obliczone z oscylogramu tensometrii dynamicznej wynosiły 0,032 do 0,05 - a więc zgodność wyjątkowo duża.

Badano również pełnościenny stalowy most trójprzęsłowy (w łuku) dla wózków wożących wlewki hutnicze. Obciążenia są tu bardzo duże (50 T na oś), stąd most bardzo sztywny. Częstość drgań własnych pionowych ok. 2,5 Hz; logarytmiczne dekrementy tłumienia drgań mierzone z przemieszczeń były tu wyjątkowo duże i wynosiły 0,20 do 0,30.

W przypadku dwuprzęsłowego mostu skrzynkowego o n = ok. 1,2 Hz w ten sam sposób i tensometrycznie mierzone wartości δ wynosiły 0,08 do 0,10; dla mostu jednoprzęsłowego skrzynkowego δ = 0,03 do 0,05. Sztywność konstrukcji jest tu bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na wielkość tak pojętego tłumienia. Kratowy stalowy kopalniany most samowyładowczy o częstości drgań własnych pionowej n = 12 Hz i poziomej n = 16 Hz jako bardzo sztywny wykazał średni logarytmiczny dekrement tłumienia mierzony z przemieszczeń δ = 0,15.

Wydaje się, że celowe byłoby opracowanie ogólnych wytycznych sposobu pomiaru logarytmicznych dekrementów tłumienia drgań w mostach celem możliwości ich porównania i przyporządkowania poszczególnym czynnikom (materiał, konstrukcja, obciążenia, sposób wzbudzenia drgań itp.).

4. Uwagi o błędach pomiaru przy stosowaniu ugięciomierzy cięgnowych

Do pomiarów zmiennych w czasie przemieszczeń, odkształceń i częstości drgań konstrukcji o małych sztywnościach i dużych rozpiętościach jak przede wszystkim mosty a również galerie, ażurowe konstrukcje stalowe, żelbetowe konstrukcje powłokowe itp. są czasami stosowane przyrządy mechaniczne (np. ugięciomierze) z bezpośrednim zapisem.

Schemat pomiarowy i przyrząd składa się z dźwigni kątowej "1" połączonej cięgnem "6" z mierzonym obiektem "7". Ruch dźwigni jest przekazywany za pośrednictwem trzpienia "2" na ramię rylca rejestrującego "3". Cięgno napinane sprężyną "4", zaś sprężyna "5" dociska trzpień "2" do dźwigni kątowej.

Ponieważ charakterystyka podanego typu przyrządów zależy od kilku parametrów zmiennych dobieranych celowo lub przypadkowo w czasie pomiaru, nie jest ona bliżej znana. Zmiennymi parametrami dla podanego schematu przyrządu mogą być:
a) długość cięgna, b) rodzaj cięgna, c) siła napinająca cięgno, d) siła dociskająca trzpień, e) siła tarcia rylca, f) przełożenie przyrządu.

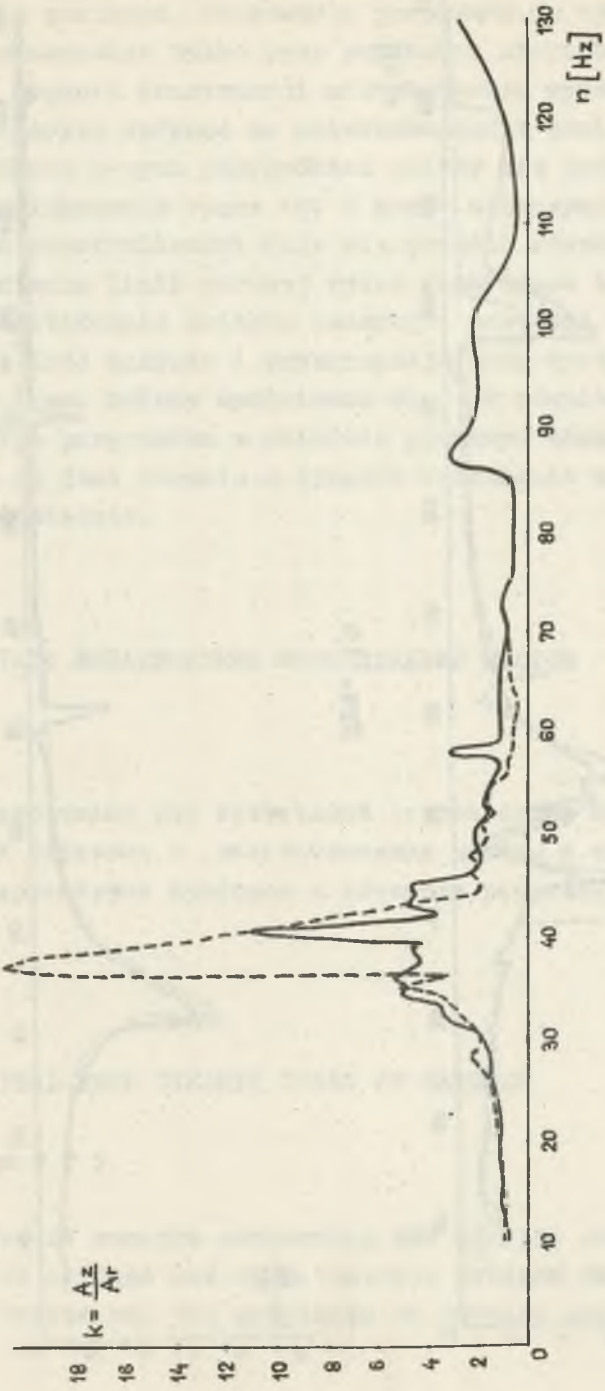
W celu zorientowania się w możliwościach zastosowania przyrządu do pomiarów dynamicznych przeprowadza się w Katedrze Dynamiki Budowli próby doświadczalne polegające na zdejmowaniu charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowych dla różnych parametrów traktowanych jako zmienne. Pierwsze próby wykonano dla zmiennych parametrów a) i b) przy ustalonych parametrach c) do f). Posłużono się przyrządem uniwersalnym dość powszechnie stosowanym do tego typu pomiarów. W czasie badania rejestrowano na taśmie woskowanej stałą, zadaną amplitudę drgań przy częstotliwościach zmiennych w sposób ciągły. Obiektem drgającym był stół wibracyjny uzupełniony układem do automatycznej regulacji i ciągłej zmiany częstotliwości. Pomiary sprawdzające przeprowadzono w laboratorium Zakładu Miernictwa Katedry Maszyn Elektrycznych AGH.

Dane dotyczące pomiarów: zadana amplituda stała stołu 0,15 mm, zakres częstotliwości 10 do 150 Hz. Całkowite powiększenie przyrządu 2 razy.

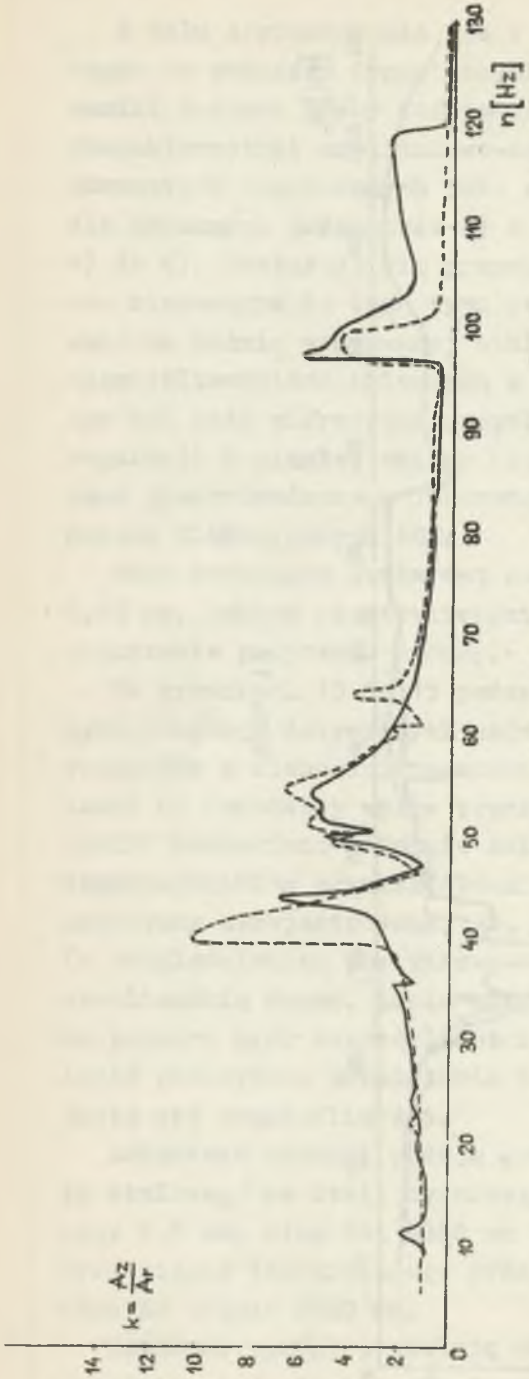
Na rysunkach 13 do 15 podano fragmentaryczne wyniki wstępnych pomiarów dotyczących najmniej korzystnego, naszym zdaniem przypadku a mianowicie pomiaru drgań w kierunku poziomym - z uwagi na dodatkowy wpływ poprzecznych drgań własnych cięgna. Wyniki zestawiono w formie zależności k = f(n), gdzie: k jest współczynnikiem zniekształcenia amplitudy równym stosunkowi amplitudy zarejestrowanej A_z do amplitudy rzeczywistej A_r (z uwzględnieniem powiększenia przyrządu) zaś n(Hz) jest częstotliwością drgań. Linia ciągła na wykresach dotyczy przypadku pomiaru przy częstotliwości drgań wzrastającej, natomiast linia przerywana przedstawia tę sama zależność przy zmniejszającej się częstotliwości.

Załączone rysunki podają wyniki uzyskane dla cięgna z drutu stalowego ze stali wysokowęglowej (R_r = 120 kG/mm^2) o średnicy 0,5 mm, długości 4380 mm (rys. 13) wzgl. 2500 mm (rys. 14) oraz cięgna dostarczanego przez wytwórcę przyrządu (rys. 15), długość cięgna 2500 mm.

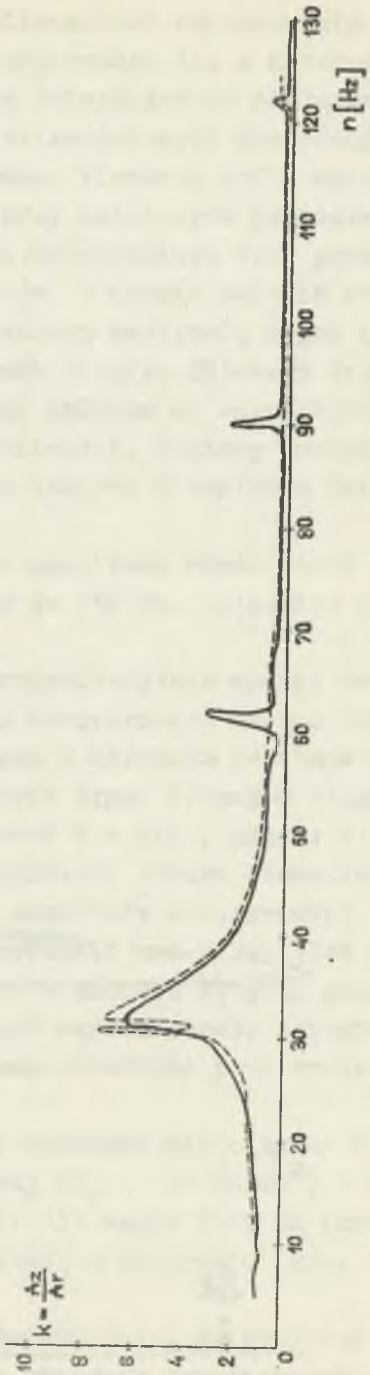
Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że przyrząd w zasadzie nie może być stosowany do pomiarów dynamicznych w


k = Az/Ar
n [Hz]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
2
4
6
8
10
12
14
16
18

Rys. 13



Rys. 14



Rys. 15

układzie poziomym. Stosowanie przyrządu do tych pomiarów może być dopuszczalne tylko przy pomiarach niskich częstotliwości, jeżeli drgania konstrukcji nie zawierają wyższych harmonicznych mogących wpłynąć na zniekształcenie powiększenia amplitudy. Nawet w tych przypadkach należy się jednak liczyć z błędami powiększenia rzędu 10% a nawet większymi. W pewnych zakresach częstotliwości daje się ponadto zauważyć okresowe przesunięcia linii zerowej rylca sugerujące błędnie "statyczne" odkształcenie obiektu badanego; wartości tych przemieszczeń są dość znaczne i przekraczają przy wyższych częstotliwościach 1 mm. Należy spodziewać się, iż również przy pomiarze tego typu przyrządem w układzie pionowym mogą wystąpić błędy. Sprawa ta jest obecnie w trakcie rozważania a wyniki podane będą oddzielnie.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОСТОВ

Резюме

Приведено целый ряд примечаний относительно проведенных исследований стальных и железобетонных мостов а также относительно измерительных приборов и точности результатов.

EXPERIENCE FROM DYNAMIC TESTS OF BRIDGES

S u m m a r y

A series of remarks concerning the carried out investigations of steel bridges and iron-concrete bridges as well as measurement devices and the precision of results have been given.