

+



Cykl seminariów

## PROJEKTOWANIE, BUDOWA i ESTETYKA KŁADEK DLA PIESZYCH

Kraków, 8 października, 5 listopada, 3 grudnia 2003 r.

1

2



Andrzej FLAGA<sup>1</sup>  
Tomasz MICHAŁOWSKI<sup>2</sup>

*kładki dla pieszych  
aerodynamika*

### AERODYNAMIKA LEKKICH KŁADEK DLA PIESZYCH

#### Streszczenie

Praca dotyczy aerodynamiki lekkich kładek dla pieszych, które są konstrukcjami podatnymi na dynamiczne działania wiatrowe. Na początku krótko scharakteryzowano podstawowe zjawiska w aerodynamice mostów. W obliczeniach aerodynamicznych kładek przyjęto model działania wiatru wg teorii quasi-ustalonej. Wyniki obliczeń były podstawą sprawdzenia warunków użytkowania analizowanych kładek.

#### 1. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA WPLYWÓW WIATRU NA OBIEKTY MOSTOWE

Zagadnienia aerodynamiki obiektów mostowych można przedstawić schematycznie jak na rys. 1. Ujęto tu zjawiska istotne dla mostów i kładek wiszących i podwieszonych. Pylony w zasadzie nie podlegają fenomenom aerodynamicznym wynikającym ze sprzężeń mechanicznych i aerodynamicznych. W ich przypadku istotne są głównie działania wiatru związane z turbulencją atmosferyczną.

Szersze omówienie przedstawionych poniżej zagadnień, można znaleźć w literaturze przedmiotu [1 ÷ 11]

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Politechnika Lubelska

<sup>2</sup> Politechnika Krakowska

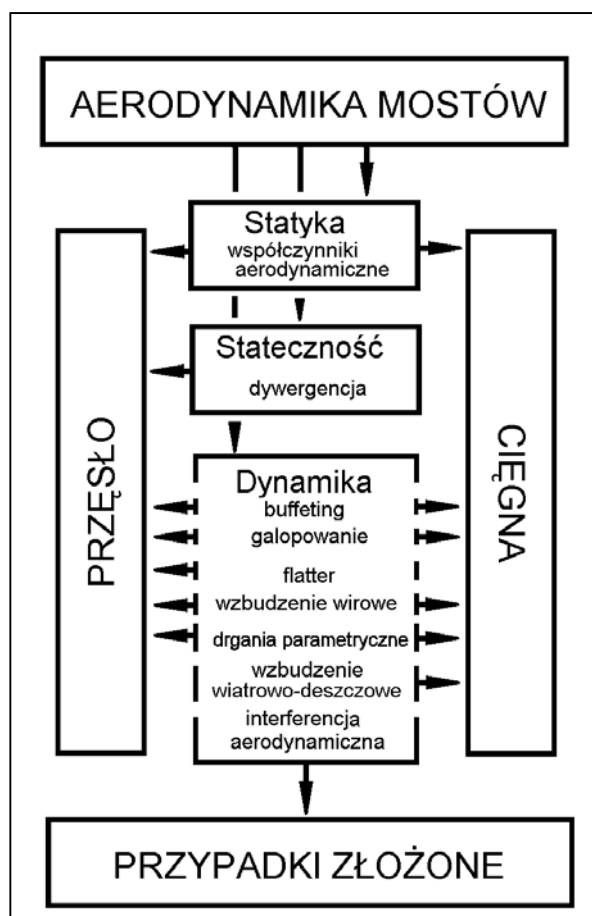
+

+

### 1.1. Statyczne działanie wiatru na smukłe elementy konstrukcyjne obiektów mostowych

W przypadku smukłych elementów konstrukcji mostowych (przęsła, pylony, kable) składowe statyczne działań aerodynamicznych na jednostkę długości elementu konstrukcyjnego przedstawić można następująco (por. rys. 2):

- W układzie związanym ze średnim kierunkiem wiatru: opór aerodynamiczny  $F_D$  działający w linii wiatru; siła aerodynamiczna boczna  $F_L$  prostopadła do linii wiatru; aerodynamiczny moment skręcający  $M$ ;



Rys. 1. Wpływy wiatru w aerodynamice mostów [12]

- W układzie związanym z przekrojem poprzecznym elementu: siła równoległa do osi  $x - F_x$ ; siła równoległa do osi  $y - F_y$ ; moment skręcający  $M$ .

2

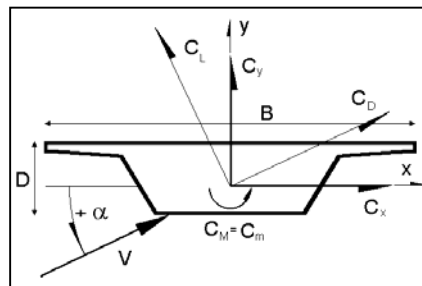
+

+

Aerodynamiczne siły i moment działające na przekrój poprzeczny w sposób statyczny dla układu związanego z wiatrem przedstawić można następująco :

$$F_D = q B C_D; \quad F_L = q B C_L; \quad M = q B^2 C_M; \quad q = \rho V^2 / 2 \quad (1)$$

gdzie:  $q$  – ciśnienie prędkości wiatru;  $B$  – wymiar charakterystyczny przekroju poprzecznego konstrukcji (zwykle szerokość przęsła);  $C_\alpha$  - odpowiedni współczynnik aerodynamiczny;  $V$  - średnia prędkość wiatru;  $\rho$  – gęstość powietrza;



Rys. 2. Współczynniki aerodynamiczne w rozważanych układach współrzędnych

Elementy o przekroju okrągłym mają niezerowy tylko współczynnik  $C_D$ , niezależny od kąta napływu. Przekroje pylonów i przęsła posiadają z reguły ostre krawędzie, na których zachodzi zjawisko oderwania się strug powietrza i dla nich wartości współczynników są uzależnione od kąta natarcia wiatru  $\alpha$ .

## 1.2. Dywergencja

Dywergencja aerodynamiczna to utrata skrętnej stateczności przęsła pod wpływem wiatru. Dywergencja związana jest z kształtem funkcji  $C_M(\alpha)$ . Prędkość dywergencji opisać można następująco [13]:

$$V_{kr}^D = \sqrt{2k / [\rho B^2 (\partial C_M / \partial \alpha) |_{\alpha=0}]} \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – sztywność skrętna; pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

## 1.3. Buffeting

Pod pojęciem buffetingu rozumie się ogół zjawisk związanych z dynamicznym działaniem wiatru na budowle, spowodowanych turbulencją atmosferyczną. Obciążenie wiatrem wywołane turbulencją ma charakter stochastyczny. Specyfika drgań konstrukcji w warunkach buffetingu wynika z ich właściwości dynamicznych.

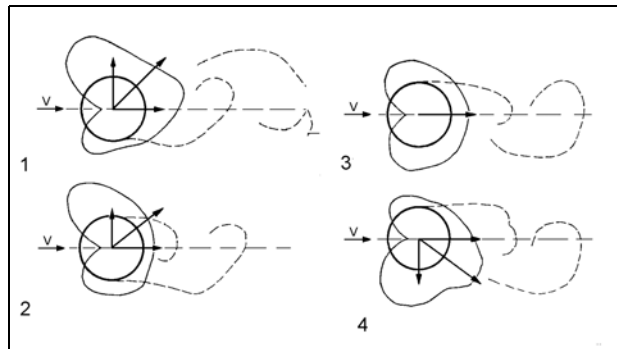
+

+

Składowe obciążenia dynamicznego wiatrem wywołane buffetingiem można z wystarczającą dla praktyki dokładnością opisać modelem quasi-ustalonym, przedstawionym dalej. Ujęcie obliczeniowe obciążenia wiatrem podane w Polskiej Normie [14] jest, w przypadku obiektów mostowych, nieadekwatne i wymaga uściślenia.

#### 1.4. Wzbudzenie wirowe

##### 1.4.1. Przekroje zwarte (ciągna, pylony)



Rys. 3. Zmiany rozkładu ciśnienia wiatru powodujące wzbudzenie wirowe [6]

Wzbudzenie wirowe przekrojów zwartych (wiry Benarda-Kármána) należy do podstawowych fenomenów aerodynamicznych. Od powierzchni opływającego przez wiatr ciała odrywają się strugi powietrza, formując wiry gruboskalowe. Powoduje to zmianę rozkładu ciśnienia wiatru na powierzchni ciała. Zmiana kierunku i wartości wypadkowej ciśnienia wiatru daje zmieniające się cyklicznie siły aerodynamiczne, z których dominującą jest siła poprzeczna do kierunku wiatru. Zjawisko to pokazane jest na rys. 3.

Prędkość krytyczną wiatru przy której zachodzi wzbudzenie wirowe można przedstawić w postaci:

$$V_{kr}^W = D f_w / St \quad (3)$$

gdzie:  $D$  – wymiar charakterystyczny przekroju;  $f_w$  – częstotliwość drgań własnych;  $St$  – liczba Strouhala.

##### 1.4.2. Przekroje wydłużone (przęsła)

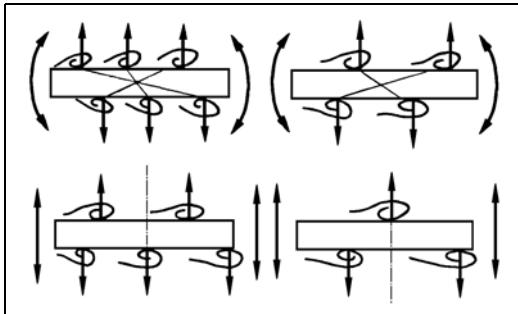
Osobnym zagadnieniem jest wzbudzenie wirowe przęseł mostów i kładek. Wymiar charakterystyczny  $B$  przęsła w kierunku wiatru jest zazwyczaj wielokrotnie większy niż wymiar poprzeczny  $D$ . W przypadku przekroju zwartego oba wymiary mają porównywalne wielkości. Powoduje to, że na przęsło możliwe jest równoczesne

4

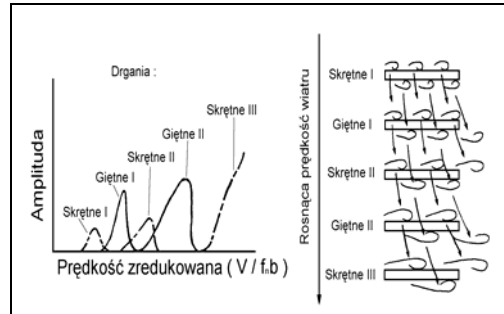
+

+

działanie kilku już oderwanych wirów. Różny rozkład wirów po obu stronach przekroju przęsła daje wzbudzenie drgań różnego typu. Rys. 4. prezentuje schemat zależności rodzaju wzbudzonych drgań (skrętne lub giętne pionowe) od rozkładu wirów po obu stronach przekroju. W przypadku wystąpienia równej liczby wirów mamy do czynienia z drganiami skrętnymi, zaś w przypadku różnej z giętymi [1, 15].



Rys. 4. Zależność rodzaju wzbudzonych drgań od rozkładu wirów [15]



Rys. 5. Zależność amplitudy wzbudzonych drgań od prędkości wiatru [15]

Liczba wirów zależy od prędkości wiatru i geometrii przęsła. Rys. 5. przedstawia poglądowo zależność rodzaju wzbudzonych drgań i ich amplitud od prędkości wiatru.

Dla przekrojów poprzecznych przęseł niezbyt wydłużonych w kierunku przepływu, wartości liczby  $St$  są rzędu  $0.08 \div 0.15$  [16].

Prędkości krytyczne wzbudzenia wirowego w przypadku kładek są z reguły niskie. Krytyczne wzbudzenie wirowe zależy od kwadratu prędkości krytycznej. Stąd też dla małych prędkości krytycznych nie jest ono znaczące. Ponadto obecność barierok, poręczy, kratownic pionowych (o wymiarach porównywalnych z wymiarami przęsła), znacząco zaburza i utrudnia odrywanie się wirów. Wzbudzenie wirowe przęsła w przypadku kładek nie stanowi na ogół poważnego problemu, jest zaś istotne w przypadku dużych mostów wantungowych i wiszących [17, 18].

### 1.5. Wzbudzenie wiatrowo-deszczowe

Wzbudzenie wiatrowo-deszczowe dotyczy przede wszystkim kabli mostów lub kładek podwieszonych. Hipotezy, mające wyjaśnić ten fenomen, bazują na fakcie, że kable są odchylone od pionu i w czasie deszczu woda ścieka wzdłuż ich powierzchni, już to oddzielnymi kroplami (przy małych prędkościach wiatru), już to jest całkowicie zdmuchiwana (przy dużych prędkościach). Jedynie dla określonego przedziału prędkości możliwe jest utworzenie się strumyczka wody, płynącego wzdłuż kabla na całej jego długości. Położenie strużki wody jest wypadkową sił grawitacji, działania wiatru i sił adhezji między powierzchnią kabla i wodą. Stwierdzono, że w przypadku kabli zabrudzonych sadzą amplitudy drgań są dużo większe niż dla kabli czystych [2].

+

+

## 1.6. Drgania samowzbudne

Do drgań samowzbudnych należą galopowanie i flutter. Po osiągnięciu przez wiatr prędkości krytycznej galopowania lub flutteru amplituda drgań teoretycznie rośnie w czasie aż do zniszczenia drgającego elementu. Galopowanie jest zjawiskiem zachodzącym dla przęseł i cięgien, rzadko dla pylonów; flutter - dla przęseł.

### 1.6.1. Galopowanie

Galopowanie związane jest z funkcjami  $C_D(\alpha)$ ,  $C_L(\alpha)$  i  $C_M(\alpha)$ . Wzory poniższe podają warunki konieczne powstania galopowania giętnego lub skrętnego oraz prędkości krytyczne galopowania giętnego  $V_{kr}^{GG}$  lub skrętnego  $V_{kr}^{GS}$ , wynikające z teorii galopowania podanej przez den Hartoga dla układu o jednym stopniu swobody [3].

$$(\partial C_L / \partial \alpha + C_D)|_{\alpha=0} < 0; \quad (\partial C_M / \partial \alpha)|_{\alpha=0} < 0 \quad (4)$$

$$V_{kr}^{GG} = - (4 m \delta f_g) / [\rho B (\partial C_L / \partial \alpha + C_D)|_{\alpha=0}] \quad (5)$$

$$V_{kr}^{GS} = - (4 J \delta f_s) / [\rho B^2 x_g (\partial C_M / \partial \alpha)|_{\alpha=0}] \quad (6)$$

gdzie:  $\delta$  - logarytmiczny dekrement tłumienia drgań konstrukcji;  $f_g$  - częstotliwość drgań własnych giętnych;  $f_s$  - częstotliwość drgań własnych skrętnych;  $m$  - masa przęsła na jednostkę długości;  $J$  - biegunowy moment masy przęsła na jednostkę długości;  $x_g$  - odległość między środkiem ciężkości a środkiem geometrycznym, mierzona wzdłuż średniego kierunku wiatru; pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

W przypadku kabli galopowanie związane jest z utratą symetrii kołowej przekroju. Wówczas współczynniki aerodynamiczne stają się uzależnione od kąta  $\alpha$ . Przyczyny niekołowości przekroju kabli mogą być różne. Najczęstszą z nich jest utrata symetrii kołowej wskutek oblodzenia [2].

### 1.6.2. Flutter

Flutter jest zjawiskiem nie do końca rozpoznany. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane wzory półempiryczne określające prędkość krytyczną flutteru oraz półempiryczny model flutteru przęsła mostu opracowany przez R.H. Scanlana. Przęsło mostu jest traktowane jak układ o dwu stopniach swobody, giętym  $y$  i skrętnym  $\varepsilon$ . Wzory półempiryczne pozwalają na zgrubne oszacowanie krytycznej prędkości flutteru. Propozycje Bachmana i Xianga wydają się dokładniejsze niż pozostałe wzory, gdyż zostały opracowane na podstawie badań dużej liczby obiektów mostowych. Model Scanlana pozwala na uzyskanie wyników dokładniejszych niż przytoczone wzory. Przy jego zastosowaniu konieczne jednak stają się badania modelu mostu w tunelu aerodynamicznym i wyznaczenie sześciu współczynników aerodynamicznych.

+

+

- Selberg [19]

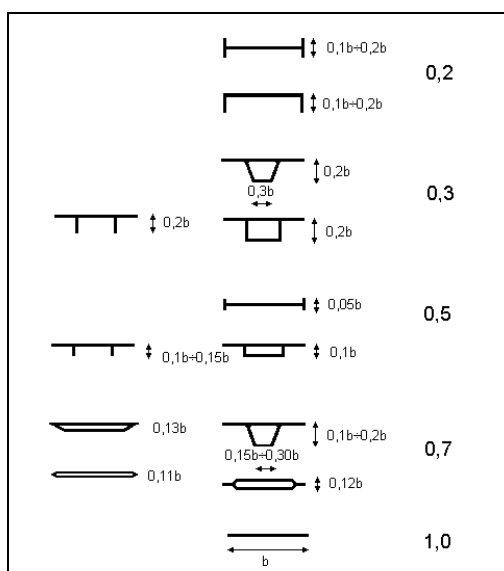
$$V_{kr}^F = 0,42B \sqrt{(\omega_s^2 - \omega_g^2)} T_{ho}^I; \quad T_{ho}^I = 2,5 \sqrt{2mr / \pi \rho B^3} \quad (7)$$

gdzie:  $T_{ho}^I$  – liczba Theodorsena dla płaskiej płyty;  $\omega_s$ ,  $\omega_g$  – częstości kołowe drgań skrętnych i giętnych mostu;  $r$  – promień bezwładności przekroju poprzecznego przęsła; pozostałe oznaczenia jak poprzednio. Wzór ten jest słuszny jest dla przekroju prostokątnego.

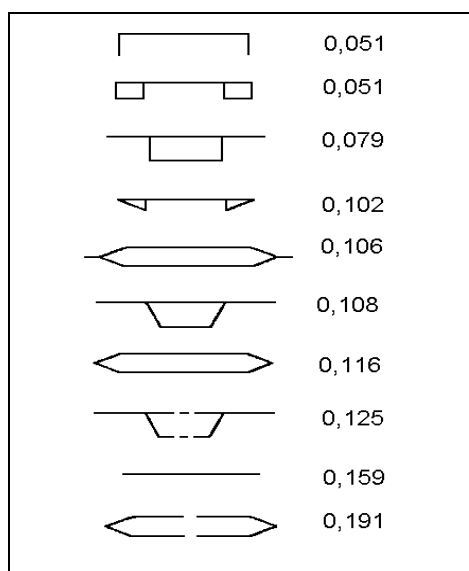
- Bachmann i inni [20]

$$V_{kr}^F = \eta_1 B \omega_g [1 + (\omega_s / \omega_g - 0,5) 0,24 T_{ho}^I] \quad (8)$$

gdzie:  $\eta_1$  - współczynnik, zależny od kształtu przęsła; pozostałe oznaczenia jak poprzednio. Wzór słuszny jest dla  $\omega_s / \omega_g > 1,2$ . Wartości parametru  $\eta_1$  podaje rys. 6.



Rys. 6. Wartości parametru  $\eta_1$  wg Bachmanna [20]



Rys. 7. Wartości parametru  $\eta_2$  wg Xiang & Cheng & Liu [21]

- Xiang & Cheng & Lin [21, 22]

$$V_{kr}^F = \eta_2 B \omega_s T_{ho}^I \quad (9)$$

gdzie:  $\eta_2$  - współczynnik, zależny od kształtu przęsła; pozostałe oznaczenia jak

+

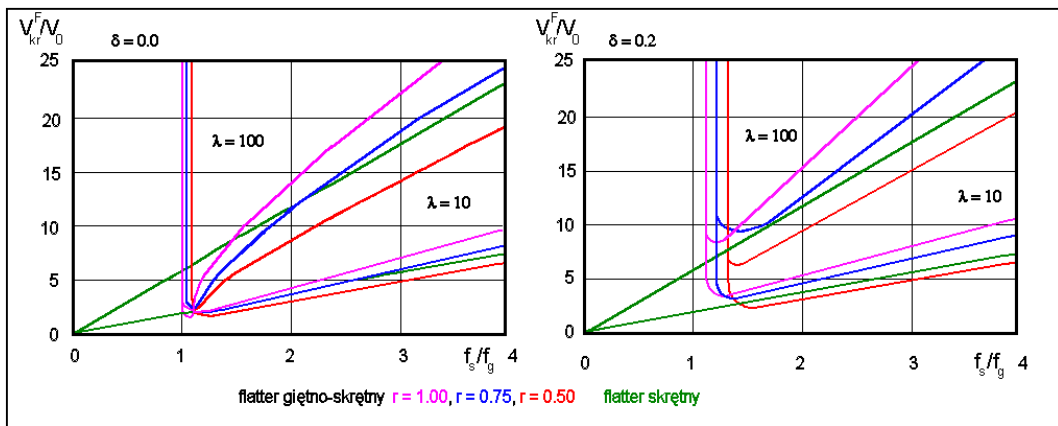
+

poprzednio. Wartości parametru  $\eta_2$  podaje rys. 7.

- Klöppel&Thiele [23], Debreceny [24]

$$V_{kr}^F = 0.163 B \sqrt{B/r} \omega_s T_{ho}^I \quad (10)$$

oznaczenia jak poprzednio. Wykresy stosunku prędkości krytycznej  $V_{kr}^F$  do  $V_o$  w zależności od parametrów  $r$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  pokazuje rys. 8.



Rys. 8. Prędkość krytyczna flatteru [24]

Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań  $\delta$  jest tu rozumiany jako średnia arytmetyczna tłumienia drgań giętnych i skrętnych, zaś parametry  $\lambda$ ,  $r$ ,  $V_o$  opisane są wzorami:

$$\lambda = 4m / \pi \rho B^2; \quad r = 2 (\sqrt{J/m}) / B; \quad V_o = B \omega_g / 2 \quad (11)$$

oznaczenia jak poprzednio. Przy wyprowadzaniu wzorów rozważano dźwigar o przekroju wydłużonym, otwartym lub zamkniętym.

- Scanlan [4]

$$M(y + x_g \varepsilon + 2\xi_g \omega_g y + \omega_g y) = L(y, \varepsilon, \varepsilon) \quad (12)$$

$$J(x_g y / r^2 + \varepsilon + 2\xi_\sigma \omega_\sigma \varepsilon + \omega_\sigma \varepsilon) = M(y, \varepsilon, \varepsilon) \quad (13)$$

$$L = qB(KH_1(K) y / V + KH_2(K) \varepsilon B / V + K^2 H_3(K) \varepsilon) \quad (14)$$

+



+

$$M = qB^2(KA_1(K) y / V + KA_2(K) \varepsilon B / V + K^2 A_3(K) \varepsilon) \quad (15)$$

$$K = B \omega / V; \quad K_{kr}^F = B \omega_{kr}^F / V_{kr}^F \quad (16)$$

gdzie:  $\xi_s, \xi_g$  – ułamki krytycznego tłumienia drgań skrętnych i giętnych mostu;  $A_i$  i  $H_i$  – współczynniki zależne od kształtu przęsła i parametru  $K$ , które należy wyznaczyć eksperymentalnie w tunelu aerodynamicznym na modelu sekcyjnym, podpartym sprężyscie;  $V_{kr}^F$  – prędkość krytyczna flutteru;  $\omega_{kr}^F$  – krytyczna częstość kołowa flutteru; pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

### 1.7. Interferencja aerodynamiczna

Interferencją aerodynamiczną nazywamy wpływ sąsiednich obiektów na zmiany opływu i obciążeń aerodynamicznych rozważanego obiektu. Obciążenie wiatrem budowli w warunkach interferencji jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym (np. [25÷28]). Zależy ono od wzajemnego położenia rozważanych obiektów i ich cech aeromechanicznych. Niemożliwe jest zbudowanie jednego, prostego modelu matematyczno-fizycznego dla każdego przypadku interferencji. Może mieć ona istotne znaczenie dla kabli położonych blisko siebie, lub znajdujących się w śladzie aerodynamicznym elementów nawietrznych.

## 2. PROCEDURA POSTĘPOWANIA W PRACACH STUDIALNYCH, DOTYCZĄCYCH WPLYWÓW WIATRU NA OBIEKTY MOSTOWE PODATNE NA DYNAMICZNE DZIAŁANIE WIATRU

W pracach studialnych dotyczących wpływów wiatru na duże lub nietypowe kładki (podobnie jak w przypadku mostów wiszących lub podwieszonych) należy przestrzegać następującej procedury postępowania:

- Wykonać studium możliwości wystąpienia drgań samowzbudnych. Zwykle niezbędne są tu badania modelowe w tunelu aerodynamicznym. Najczęściej są to badania modelu sekcyjnego przęsła, zawieszzonego sprężyscie. Jeśli zjawiska takie wystąpią, koryguje się tak geometrię przekroju poprzecznego przęsła, by zjawiska te całkowicie wyeliminować lub znacząco zredukować;
- Wykonać studium możliwości wystąpienia drgań w warunkach krytycznego odrywania się wirów. Potrzebne są tu badania modelowe jak wyżej, łącznie z ponowną korektą geometrii kształtu przekroju poprzecznego przęsła;
- Wykonać studium wpływu turbulencji atmosferycznej (buffetingu) na zachowanie się kładki (mostu). Można tego dokonać albo na podstawie badań modelowych w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyscienną, symulującą wiatr przy ziemi, albo też na drodze teoretyczno-eksperymentalnej na podstawie obliczeń aerodynamicznych, przyjmując jeden z modeli opisujących buffeting (np. model

+

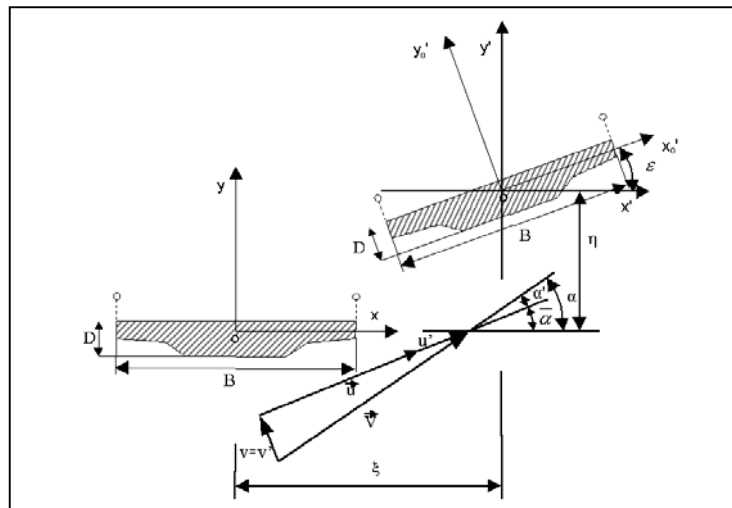
+

quasi-ustalony) oraz wykorzystując współczynniki aerodynamiczne tego modelu, otrzymane z badań modelowych – gdy nie są one znane, lub z literatury – w sytuacjach przebadanych wcześniej. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że coraz częściej badania modelowe są uzupełniane lub weryfikowane obliczeniami komputerowymi z wykorzystaniem różnych programów burzliwie rozwijającej się dzisiaj komputerowej mechaniki płynów. Otrzymane w ten sposób wyniki wykorzystywane są następnie w obliczeniach aerodynamicznych całej konstrukcji, przyjmując różne dodatkowe założenia upraszczające.

### 3. MODELOWANIE DZIAŁANIA WIATRU WG TEORII QUASI-USTALONEJ

#### 3.1. Teoria quasi-ustalona

Do opisu działania wiatru, uwzględniającego turbulencję aerodynamiczną (buffeting) i sprzężenia zwrotne drgająca budowla – wiatr, najczęściej stosuje się w praktyce inżynierskiej modele tzw. teorii quasi-ustalonej. W szczególnych przypadkach opisują one klasyczne zjawiska aerodynamiczne, jak galopowanie i flutter. Prędkości krytyczne tych zjawisk otrzymane z teorii quasi-ustalonej są zwykle mniejsze od otrzymanych w badaniach modeli w tunelu aerodynamicznym lub wyznaczonych bardziej zaawansowanymi modelami (np. Scanlana). W klasycznej teorii quasi-ustalonej wzbudzenie wirowe nie występuje.



Rys. 9. Relacje między wielkościami geometrycznymi i prędkościami wiatru, rozważanymi w teorii quasi-ustalonej [29]

+

+

W pracach [29÷31] omówiono podstawy teorii quasi-ustalonej oraz opracowano na jej podstawie nowe modele oporu aerodynamicznego  $w_x$ , obciążenia poprzecznego (aerodynamicznej siły bocznej)  $w_y$  i skrętnego  $w_m$  budowli smukłych wiatrem na jednostkę ich długości. Składowe obciążenia wiatrem można według tej teorii przedstawić następująco (por. rys. 9):

$$w_x = q B [C_x + C_{xy} \phi_w]; \quad w_y = q B [C_y + C_{yx} \phi_w]; \quad w_m = q B^2 [C_m + C_{mm} \phi_w] \quad (17)$$

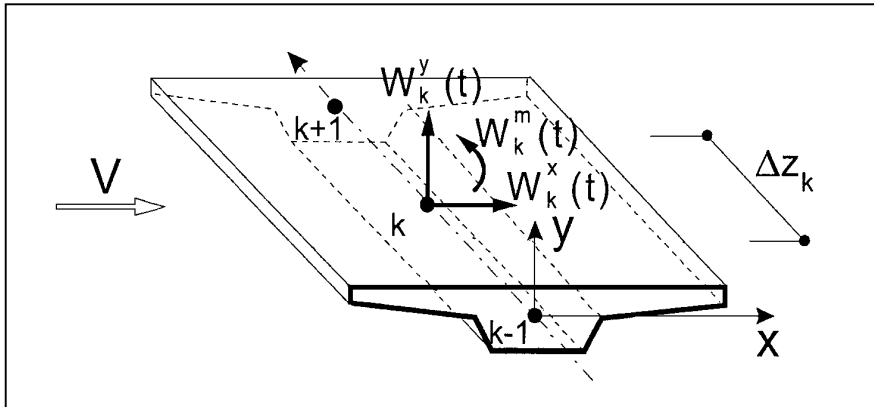
$$C_{xy} = (\partial C_x / \partial \alpha)|_{\alpha=0}; \quad C_{yx} = (\partial C_y / \partial \alpha)|_{\alpha=0}; \quad C_{mm} = (\partial C_m / \partial \alpha)|_{\alpha=0}$$

$$q = \rho (\bar{u} + u')^2 / 2$$

$$\phi_w = (v' + \xi \sin \bar{\alpha} - \eta \cos \bar{\alpha}) / (\bar{u} + u') - \varepsilon [x_G \cos (\bar{\alpha} - \varepsilon) + y_G \sin (\bar{\alpha} - \varepsilon)] / (\bar{u} + u') - \varepsilon \quad (18)$$

gdzie:  $u, u', v', \alpha, \xi, \eta, \varepsilon$  – prędkości, przemieszczenia i kąty według rys. 9;  $x_G, y_G$  – współrzędne środka ciężkości  $G$  krzywej brzegowej;  $C_x, C_y, C_m, C_{xy}, C_{yx}, C_{mm}$  – współczynniki aerodynamiczne;  $\bar{A}$  – wartość średnia (statyczna, uśrednienie czasowe);  $A' = dA/dt$ ;  $A'$  – fluktuacje.

Most traktuje się jako układ złożony z elementów skończonych. W celu określenia działania wiatru na przeszło rozpatruje się wycinek przeszła (superelement) jak na rys. 10. Węzły  $k = 1, 2, \dots, p$ , dzielą przeszło mostu na superelementy.



Rys. 10. Wycinek przeszła mostu poddany działaniu wiatru [29]

Obciążenia wiatrem  $w_i(z, t)$  segmentu przeszła mostu o długości  $\Delta z_k$  zostały skupione w węźle  $k$  i nazwane uogólnionymi albo węzłowymi obciążeniami wiatrem:

+

+

$$W_k^x(t) = w_x(z_k, t)\Delta z_k; W_k^y(t) = w_y(z_k, t)\Delta z_k; W_k^m(t) = w_m(z_k, t)\Delta z_k \quad (19)$$

Podobnie można postąpić w odniesieniu do cięgien i pylonów mostu, z tym, że tam rozważa się zwykle tylko składowe statyczne obciążeń wiatrem. Analogicznie zdefiniować można wektor przemieszczeń uogólnionych  $\{q(t)\}$ .

W analizie dynamicznej działania wiatru na obiekt mostowy przyjmuje się jako stan wyjściowy położenie równowagi statycznej obiektu pod obciążeniem ciężarem własnym, ewentualnym sprężeniem wstępnym i statycznym działaniem wiatru. Pod wpływem składowej fluktuacyjnej tego obciążenia budowla drga wokół statycznego położenia równowagi. Jeśli amplitudy drgań są małe, można przyjąć liniowe równanie drgań tłumionych konstrukcji o skończonej liczbie stopni swobody w postaci:

$$[M]\{q\} + [C]\{q\} + [K]\{q\} = \{w\} \quad (20)$$

gdzie  $[K]$  – macierz sztywności (styczna),  $[C]$  – macierz tłumienia masowo-sztywnościowego,  $[M]$  – macierz bezwładności (mas),  $\{w\}$  – wektor uogólnionych obciążeń,  $\{q\}$  – wektor uogólnionych przemieszczeń.

Most podwieszony lub wiszący jest układem dynamicznym o bardzo dużej liczbie stopni swobody. Można dla niego zbudować układ zastępczy o kilku stopniach swobody korzystając np. z metody ortogonalizacyjnej Bubnowa-Galerkina:

$$\{q\{t\}\} = \sum_i \{\Phi\}_i \Psi_i(t) \quad (21)$$

Funkcjami kształtu  $\{\Phi\}_i$  są zazwyczaj postaci drgań własnych. Ograniczając rozważania do udziału w odpowiedzi dynamicznej układu tylko kilku najniższych postaci drgań własnych, nie popełnimy na ogół większego błędu. Równania ruchu układu zastępczego zapisać można jak następuje:

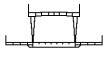





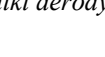
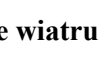
$$M_j \ddot{\Psi}_j(t) + C_j \dot{\Psi}_j(t) + K_j \Psi_j(t) = W_j(t); \quad j = x, y, \varepsilon \quad (22)$$

W wyniku zastosowania wzorów (17)-(22) otrzymuje się sprzężony, nieliniowy układ stochastycznych równań różniczkowych zwyczajnych o zmiennych współczynnikach. Rozwiązanie takiego układu równań można otrzymać tylko w drodze ich numerycznego całkowania, symulując prawe strony tych równań.

Przykładowe wartości współczynników aerodynamicznych  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_{xy}$ ,  $C_{yx}$  dla różnych kształtów przekrojów poprzecznych przęsła przedstawiono na rys. 11 [16].

+

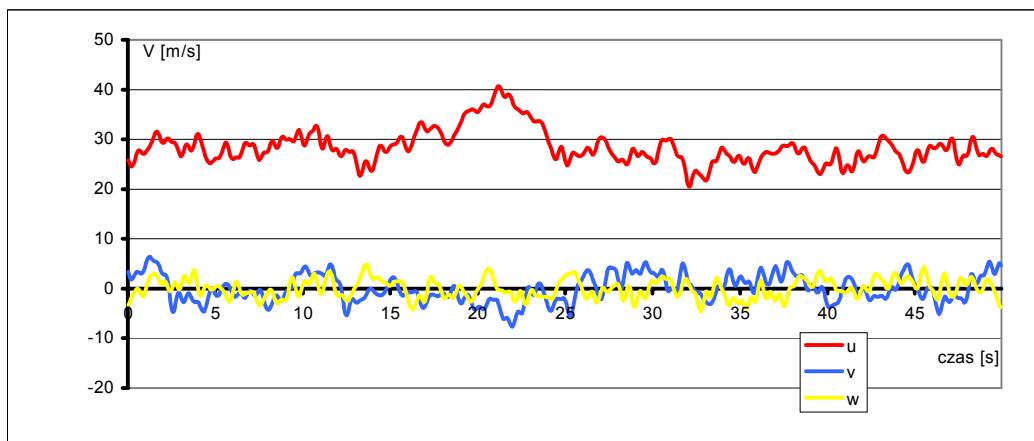
+

	$C_x(0)$	$C_{xy}(0)$	$C_y(0)$	$C_{yx}(0)$
	0,24	-0,06	-0,07	2,59
	0,53	0,21	0,82	-
	0,22	-0,29	0,205	2,24
	0,14	0,24	-0,03	3,92
	0,05	0,32	-0,41	5,25
	0,09	0,11	0,046	3,63
	0,075	0,48	-0,45	4,44
	0,135	-0,095	-0,07	5,06

Rys. 11. Współczynniki aerodynamiczne dla wybranych przekrojów poprzecznych przęśła [16]

### 3.2. Stochastyczne pole wiatru

Stochastyczne pole wiatru symulowane było przy pomocy programu numerycznego. Program pozwala na wygenerowanie pola wiatru o zadanych parametrach w kilku punktach przestrzeni. Odpowiednie procedury numeryczne z wykorzystaniem modelu jak wyżej, łącznie z symulacją pola prędkości wiatru opracował zespół pracowników Katedry Mechaniki Budowli Politechniki Lubelskiej i Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej [32, 33]. Przykład symulacji trzech składowych prędkości wiatru przedstawiono na rys. 12.



Rys.12. Trzy składowe prędkości wiatru – przykład symulacji [12]

+

+

Dla wszystkich analizowanych dalej kładek symulacja wiatru odbywała się przy następujących założeniach: potęgowy profil wiatru ( $\alpha = 0,24$ ); teren otwarty; prędkość średnia 28.4 m/s; krok czasowy 0.05 s; ilość kroków 5000 (250 s); skala turbulencji 100 m;

### 3.3. Metodologia obliczeń

Analizę aerodynamiczną rozważanych kładek przeprowadzono zgodnie z następującą metodologią [17, 18, 34÷38]:

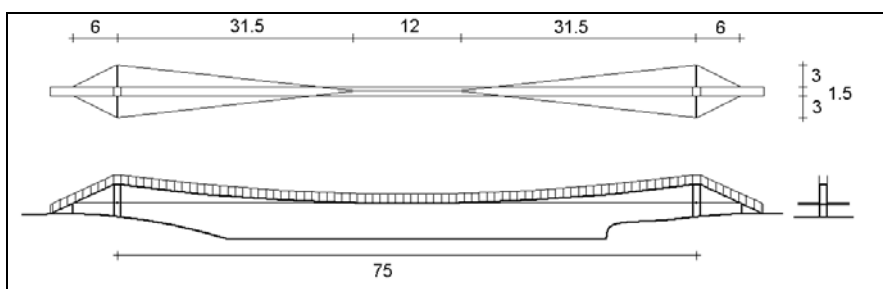
- Przeprowadzono obliczenia statyczne kładek, obciążonych ciężarem własnym, sprężeniem wstępnym i statycznym działaniem wiatru;
- Rozwiązano zagadnienie małych drgań własnych wokół położenia równowagi statycznej;
- Dla każdej z kładek dokonano symulacji pola prędkości wiatru;
- Za pomocą numerycznego programu obliczeniowego opracowanego w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej rozwiązano problem drgań wymuszonych konstrukcji w wygenerowanym polu wiatru. Procedura pozwala na analizę buffetingu, dywergencji aerodynamicznej, flutteru i galopowania.

Dla zaproponowanego rozwiązania przeszła kładki dokonano kompleksowych obliczeń statycznych w oparciu o Polskie Normy [14, 39].

## 4. OBLICZENIA AERODYNAMICZNE KŁADEK

### 4.1. Opis konstrukcji analizowanych kładek

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń sześciu kładek dla pieszych, wstępowej w Myślenicach, wiszących w Tropiu, Rożnowie, Tylmanowej, Piwnicznej i podwieszanej w Rzeszowie.



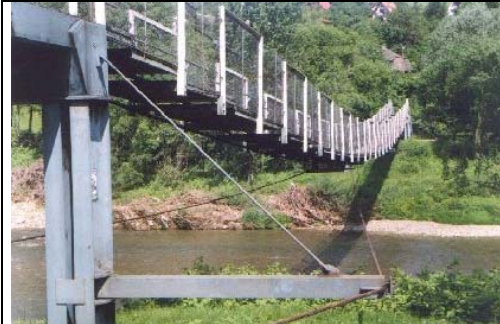
Rys. 13. Kładka w Myślenicach [12]

Kładka dla pieszych w Myślenicach przez Rabę, wstępowa, o strzałce ugięcia ok. 2.5 m, jednoprzęsłowa, o rozpiętości 75 m. Pomost drewniany, oparty na linach

+

+

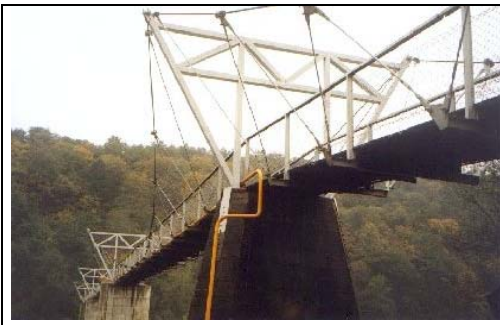
nośnych. Kładka bardzo wiotka, po kilkukrotnej dywergencji usztywniono ją w kierunku poziomym dwiema parami dodatkowych lin napinających.



Rys. 14. Kładka w Myślenicach [12]



Rys. 15. Kładka w Piwnicznej [12]



Rys. 16. Kładka w Rożnowie [12]



Rys. 17. Kładka w Rzeszowie [12]



Rys. 18. Kładka w Tropiu [12]

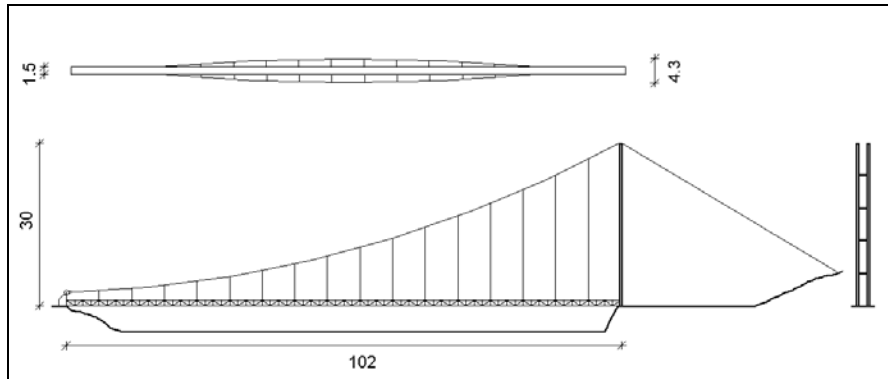


Rys. 19. Kładka w Tylmanowej [12]

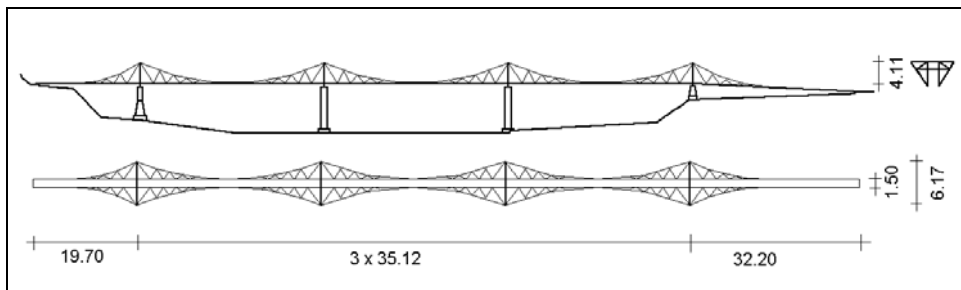
Kładka dla pieszych w Piwnicznej przez Poprad, wisząca, jednopylonowa, jednoprzęsłowa, o rozpiętości 102 m, wysokość pylonu 30 m, o przęśle kratownicowym. Pomost w formie stalowej płyty ortotropowej. Dodatkowe usztywnienie poziome w formie dwu poziomych łuków stalowych.

+

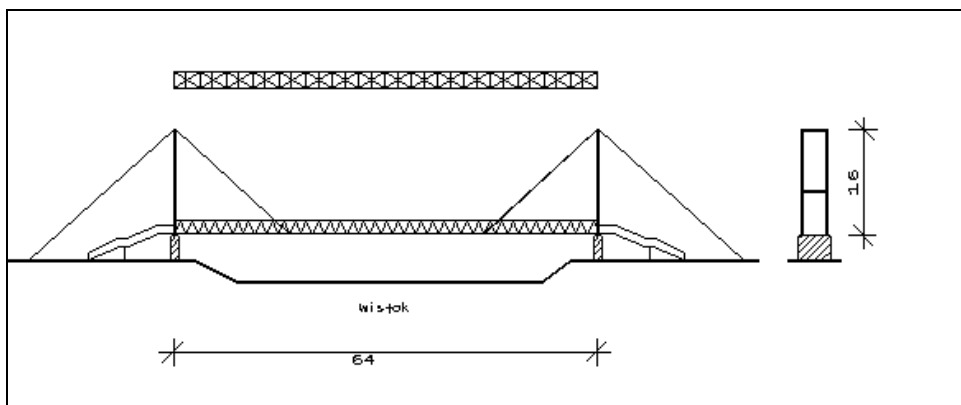
+



Rys. 20. Kładka w Piwnicznej [12]



Rys. 21. Kładka w Rożnowie [12]



Rys. 22. Kładka w Rzeszowie [12]

Kładka dla pieszych w Rożnowie przez Dunajec, wisząca, pięcio-przęsłowa, z czterema pylonami, o rozpiętości przęsła 35 m, całkowitej 157 m, wysokość pylonu 4 m. Pomost drewniany, oparty na linach nośnych. Zastosowano rozbieżny układ wieszaków.

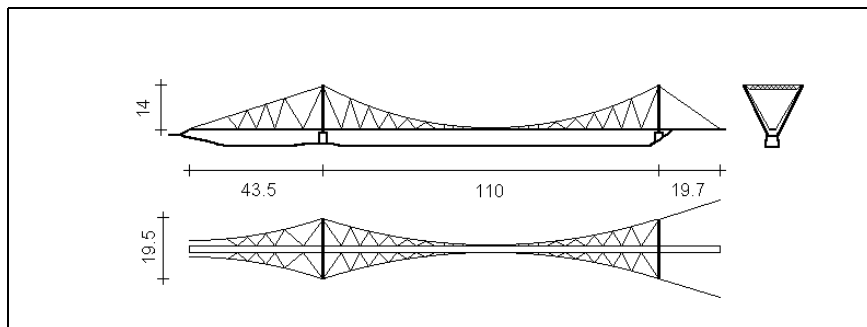
+



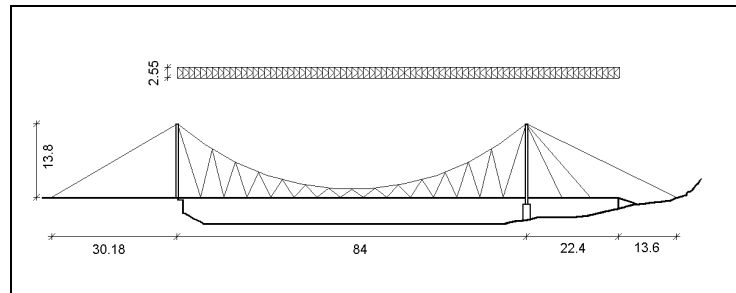
+

Kładka dla pieszych w Rzeszowie przez Wisłok, podwieszona, dwupylonowa, jednoprzęsłowa, o rozpiętości 64 m, wysokość pylonów 14 m, o prześle kratownicowym.

Kładka dla pieszych w Tropiu przez Dunajec, wisząca, dwupylonowa, dwuprzęsłowa, o rozpiętości głównego przęsła 110 m, całkowita rozpiętość 156 m, wysokość pylonu 14.5 m. Pomost drewniany, oparty na linach nośnych. Zastosowano rozbieżny układ wieszaków.



Rys. 23. Kładka dla pieszych w Tropiu [12]



Rys. 24. Kładka w Tylmanowej [12]

Kładka dla pieszych w Tylmanowej przez Dunajec, druga z czterech kładek w Tylmanowej i Ochotnicy, wisząca, dwupylonowa, dwuprzęsłowa, o rozpiętości głównego przęsła 84 m, całkowita rozpiętość 110 m, wysokość pylonu 13.8 m. Pomost drewniany, oparty na poziomej wiatrownicy.

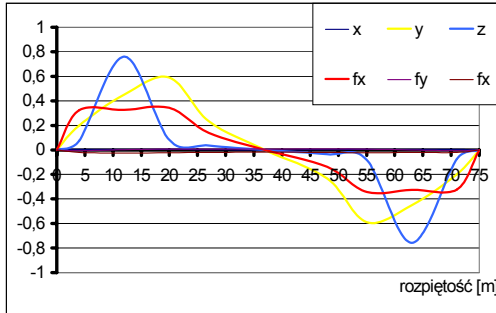
#### 4.2. Drgania własne

Analizowane kładki są konstrukcjami wiotkimi. Postaci drgań własnych konstrukcji odkształconych wokół ich położenia równowagi statycznej mają charakter złożony. Na rys. 25 pokazano postaci drgań własnych kładki

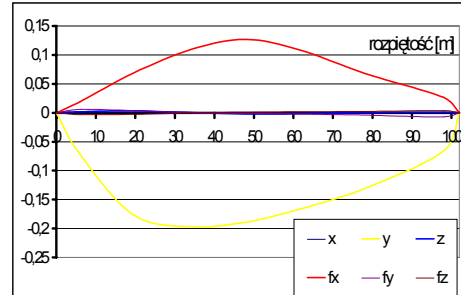
+

+

w Myślenicach, zaś na rys. 26 – w Piwnicznej. Dokładne zestawienie postaci i częstotliwości drgań przedstawiono w tab. 1.



Rys. 25. Giętna pionowa asymetryczna postać drgań własnych kładki w Myślenicach,  $f_w = 1.096 \text{ Hz}$  [12]



Rys. 26. Pozioma symetryczna postać drgań własnych kładki w Piwnicznej,  $f_w = 0.588 \text{ Hz}$  [12]

Tab. 1. Częstotliwości i postaci drgań własnych kładek [12]						
Kładka	Częstotliwość [Hz] i postać					
Myślenice	H S	H T V A	V T S	V T S		
	0.963	1.096	1.202	1.223		
Piwniczna	H T S	H T S	H T A	V S	H T A	V A
	0.588	0.685	0.936	1.156	1.326	1.404
Rożnów	H T A	H T A	H T S	V S		
	0.610	0.638	0.692	1.006		
Rzeszów	H T S	V S	H T S	H T A		
	1.778	2.055	3.609	3.126		
Tropie	H T S	H T V S	H T A	H T A		
	0.500	0.813	0.871	1.223		
Tylmanowa	H S	1.803	V S	T S		
	1.215	H S	1.862	1.959		

S – symetryczna lub quasi-symetryczna postać drgań,  
A – antysymetryczna lub quasi-antysymetryczna postać drgań,  
H – pozioma lub quasi-pozioma postać drgań,  
V – pionowa lub quasi-pionowa postać drgań,  
T – skrętna lub quasi-skrętna postać drgań

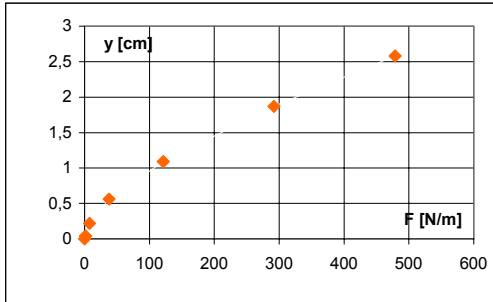
#### 4.3. Przykładowe wyniki obliczeń aerodynamicznych

W przypadku zależności przemieszczenie - statyczna siła aerodynamiczna oraz ruchu płaskiego środka rozpiętości przeszła pojawiły się dwa odrębne typy kładek. Do jednego zaliczają się kładki w Tropiu i Rożnowie, do drugiego pozostałe kładki. Dla

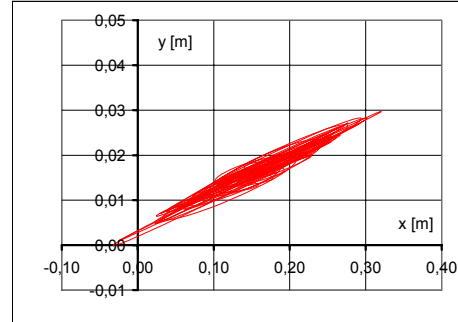
+

+

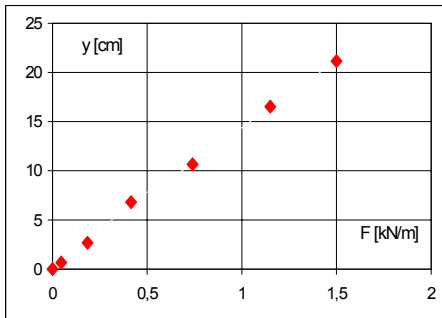
typu pierwszego zależność między przemieszczeniem poziomym i statyczną poziomą siłą aerodynamiczną ma charakter nieliniowy, zaś kształt ruchu środka przęsła przypomina tor ruchu drgającego wahadła. Rysunki 27÷30 przedstawiają zależność między przemieszczeniem i statyczną siłą aerodynamiczną, oraz trajektorię drgań przęsła dla pierwszego i drugiego typu kładek.



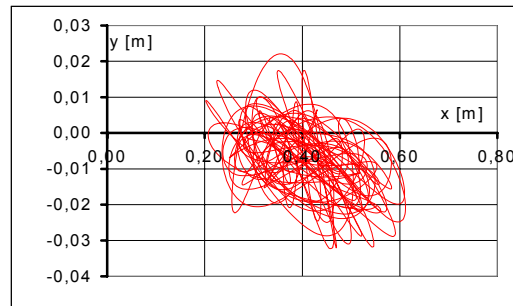
Rys. 27. Zależność przemieszczenia od statycznej siły aerodynamicznej na przykładzie kładki w Rożnowie [12]



Rys. 28. Trajektoria drgań środka przęsła na przykładzie kładki w Rożnowie [12]



Rys. 29. Zależność przemieszczenia od statycznej siły aerodynamicznej na przykładzie kładki w Piwnicznej [12]



Rys. 30. Trajektoria drgań środka przęsła na przykładzie kładki w Piwnicznej [12]

## 5. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Pełne zestawienie przemieszczeń statycznych i amplitud drgań podano w tab. 2. W analizie sztywności kładek uwzględniono dwa rodzaje parametrów. Pierwszym są przemieszczenia i kąty skręcenia przęsła kładek, zarówno statyczne ( $\psi_s$ ,  $\xi_s$ ,  $\varepsilon_s$ ), jak i amplitudy drgań ( $\psi_A$ ,  $\xi_A$ ,  $\phi_A$ ), przedstawione jako wielkości bezwymiarowe (radiany; przemieszczenia odniesione do rozpiętości przęsła):

$$\psi = x / L; \quad \xi = y / L \quad (23)$$

+

+

gdzie:  $x$ ,  $y$  – przemieszczenie poziome lub pionowe przęsła kładki w środku rozpiętości lub amplituda drgań w odpowiednim kierunku;  $L$  - rozpiętość przęsła.

Drugim parametrem jest parametr  $\gamma$ , opisujący stosunek ciężaru własnego przęsła do ciężaru użytkowego, który przęsło może teoretycznie przenieść.

Tabela 2 Analiza sztywności przestrzennej kładek.[12]							
Kładka	$\gamma$	Przemieszczenia statyczne			Amplitudy drgań		
		1000 $\psi_S$	1000 $\xi_S$	$\varepsilon_S$ [rad]	1000 $\psi_A$	1000 $\xi_A$	$\varepsilon_A$ [rad]
Tropie	0.101	1.010	0.353	0.059	0.063	0.009	0.004
Rożnów	0.165	2.414	0.367	0.070	0.861	0.071	0.030
Myślenice	0.198	0.529	0.033	-0.056	0.192	0.502	0.043
Tylmanowa	0.312	0.047	0.000	0.000	0.018	0.066	0.000
Piwniczna	0.372	1.031	0.010	0.009	0.345	0.142	0.035
Rzeszów	0.438	0.139	-0.047	0.009	0.016	0.039	0.000

Oceniając wartości przemieszczeń statycznych oparto się na normie PN [40]. Punkt 3.5.2 normy podaje, że dopuszczalne przemieszczenie pionowe przęsła nie może być większe, niż 1/500 rozpiętości przęsła, przy czym dla kładek i drogowych mostów wiszących wartość tę można zwiększyć o 30 %. Punkt 3.5.3 tej samej normy podaje też warunek, precyzujący sztywność poziomą przęsła, a zatem:

$$\Delta y < 0.0026L; \quad T < 0.1 L \quad (24)$$

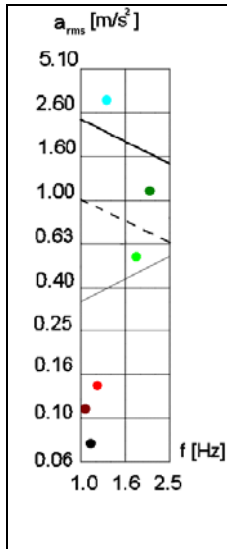
gdzie:  $T$  – okres drgań własnych poziomych przęsła [s];  $L$  – rozpiętość [m].

Norma nie podaje warunku, ograniczającego wartość kąta skrzywienia przęsła. Zaproponowano go w oparciu o fakt, że ruch pieszy powinien być możliwy po kładce oblodzonej i ograniczono wartość kąta do 3°.

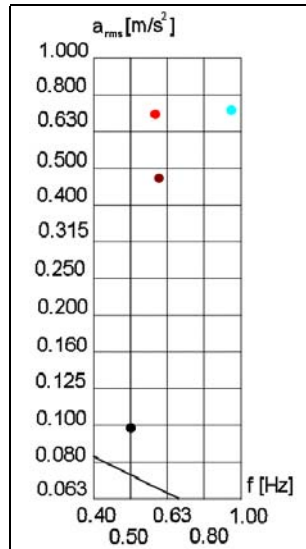
Gdy chodzi o kryteria dynamiczne dotyczące wpływu drgań na pieszych przechodzących przez kładkę, uwzględniono prace [41÷43]. Wartości dopuszczalne znajdują się poniżej linii przedstawionych na rys. 31÷33, które pokazują wyniki dotyczące analizowanych kładek. Linia grubą oznaczono kryterium dla mostów [41], przerywaną dla kładek [42], zaś cienką według [43]. Wyniki oceny warunków użytkowania omawianych kładek przedstawiono w tab. 3, gdzie symbolami S i N oznaczono spełnienie lub niespełnienie odpowiednich warunków.

+

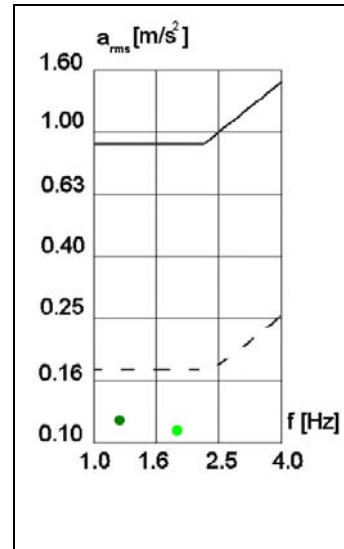
+



Rys. 31. Przyspieszenia drgań pionowych.[12]



Rys. 32. Przyspieszenia drgań poziomych dla częstotliwości drgań mniejszej od 1 Hz.[12]



Rys. 33. Przyspieszenia drgań poziomych dla częstotliwości drgań większej od 1 Hz.[12]

Myślenice, Piwniczna, Rożnów, Rzeszów, Tropie, Tylmanowa.

Tab. 3. Spełnienie warunków użyteczności [12]					
Kładka	Przemieszczenia statyczne			Amplitudy	
	x	y	$\phi$	x	y
Myślenice	S	S	N	N	N
Piwniczna	S	S	S	N	S
Rożnów	S	S	N	N	S
Rzeszów	S	S	S	S	S
Tropie	S	S	N	N	S
Tylmanowa	S	S	S	S	N

## 6. WNIOSKI

- Lekkie kładki dla pieszych (Myślenice, Rożnów, Tropie) wypadają bardzo niekorzystnie w porównaniu z innymi rodzajami kładek. Kładka wstęgowa nie spełnia żadnego z warunków dynamicznych i warunku statycznego kąta skrzywienia; kładki o pochylonym układzie lin nie spełniają kilku warunków statycznych, jak i dynamicznych;
- Trajektorie ruchu kładek o pochylonym układzie lin są podobne do ruchu wahadła.

+

+

Ich sztywność pionowa, pozioma i skrętna pochodzi głównie od pochylonego układu lin, sztywność samego przęsła jest bardzo mała. W przypadku pozostałych kładek o ich sztywności decyduje zarówno sztywność przęsła jak i systemu nośnego;

- W przypadku kładki w Myślenicach stwierdzono możliwość wystąpienia niestabilności aerodynamicznej;
- Dla większości kładek zależność między przemieszczeniami, wywołanymi statycznym działaniem wiatru a wartością tych działań jest liniowa. Jednie dla kładek o pochylonym układzie lin zależność ta jest nieliniowa;
- Spośród kładek dla pieszych najlepszym rozwiązaniem wydaje się przęsło o poziomym i pionowym stężeniu kratownicowym (Rzeszów). Jedynie takie przęsło spełniają wszystkie warunki statyczne i dynamiczne;
- Brak kratownicy poziomej (Piwniczna) lub pionowej (Tylmanowa) powoduje niespełnienie warunków dynamicznych, związanych z kierunkiem pozbawionym kratownicy.

#### Literatura

- [1] FLAGA A., FLAGA K., MICHAŁOWSKI T., *Problemy aerodynamiki mostów wiszących i podwieszonych*, Inżynieria i Budownictwo, 9/1996, 508÷516
- [2] FLAGA A., MICHAŁOWSKI T., *Zagadnienia aerodynamiki ciągłych w mostach podwieszonych*, Inżynieria i Budownictwo, 6/1997, 316÷321
- [3] BLEVINS R.P., *Flow-induced vibration*, van Nostren Reinold, New York 1990
- [4] SCANLAN R. H., SIMIU E., *Wind effects on structure, an introduction to wind engineering*, John Willey&Sons Inc. Toronto 1978
- [5] FISCHER O., KOLOUŠEK V., NÁPRSTEK J., PIRNER M., *Wind effects on civil engineering structures*, Academia Praha 1983
- [6] ŻURAŃSKI J., *Obciążenie wiatrem budowli i konstrukcji*, Arkady Warszawa 1978
- [7] FLAGA A., KAWECKI J., *Współczynniki oporu aerodynamicznego i momentu aerodynamicznego dla mostów przy obciążeniu wiatrem*, Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej: Ocena nośności mostów - teoria i badania , Gliwice - Kozubnik 1985, 45÷50
- [8] FLAGA K. FLAGA A., *Obciążenie wiatrem budowli mostowych w świetle obowiązujących norm krajowych*, Drogownictwo 12/1983, 336÷339
- [9] BILISZCZUK J., HILDEBRAND M., *O projektowaniu mostów podwieszonych*, Inżynieria i Budownictwo 2/1998, 81÷85
- [10] BILISZCZUK J., KLASZTORNY M., *Obliczenia aerodynamiczne mostów wantowych*, Materiały XLV Konferencji Naukowej KILiW PAN KN PZITB 1999, vol. V 47÷54
- [11] BILISZCZUK J., FLAGA A., *Procedura uwzględniania działania wiatru w projektowaniu mostów podwieszonych*, Inżynieria i Budownictwo 9/1999, 487÷491
- [12] MICHAŁOWSKI T. , *Analiza aerodynamiczna sztywności przestrzennej lekkich stalowych kładek dla pieszych (rozprawa doktorska)*, Politechnika Krakowska, Kraków 2002
- [13] *Eurocode 1. Basic of design and actions on structures; Part 2.4 Wind actions.*
- [14] *PN-77 / B-02011, Obciążenia w obliczeniach statycznych, obciążenie wiatrem*
- [15] BOSAK G., FLAGA F., MICHAŁOWSKI T., *Modelowanie wzbudzenia wirowego przęsła mostów podwieszonych i wiszących*, Materiały III Ogólnopolskiego sympozjum Wpływy środowiskowe na budowlę i ludzi; obciążenie, oddziaływanie, interakcje, dyskomfort, Politechnika Lubelska 2001, 29÷36
- [16] BIETRY J., *Wind effects on footbridges*, Proc. of the 1<sup>st</sup> International Conference on Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Footbridges 2002, OUTA Paris 2002, 82÷91

+

+

- [17] BĘC J., BŁAZIK-BOROWA E., FLAGA A., PODGÓRSKI J., *A comparative aerodynamics analysis of two cable-stayed bridges built in Poland*, Proc. of 3<sup>rd</sup> East European Conference on Wind Engineering, Kiev 2002, 86÷89
- [18] FLAGA A., PODGÓRSKI J., BĘC J., BŁAZIK-BOROWA E., BOSAK G., *Analiza aerodynamiczna mostu podwieszonoego III Tysiąclecia im Jana Pawła II w Gdańsku*, Drogi i Mosty, Instytut Badawczy Dróg i Mostów 4/2002, 5÷39
- [19] SELBERG A., *Aerodynamic effects on suspension bridges*, WEBS Teddington, Her Majesty's Stationery Office 1963, 462÷469
- [20] *Vibration problems in structures; practical guidelines*, Bulletin d'Information No 209 CEB, praca zbiorowa pod redakcją H. BACHMANA, Lozanna 1991
- [21] XIANG H. F., CHENG A. R., LIN Z. X., *An introduction to the Chinese wind-resistant design guideline for highway bridges*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol. 74÷76/1998, 903÷911
- [22] XIANG H. F., CHENG A. R., LIN Z. X., *An introduction to the Chinese wind-resistant design guideline for highway bridges*, Proc. of 2<sup>nd</sup> European&African Conference on Wind Engineering, 1557÷1584
- [23] VON KLÖPPEL K., THIELE F., *Modellversuche in Windkanal zur Bemessung von Brücken gegen die Gefahr Winderregerter Schwingungen*, Der Stahlbau 12/1963, 353÷365
- [24] VERTES G. *Structural dynamics*, Budapest Academiai Kiado, 1985
- [25] RUSCHEWEYH H., *Dynamische Wirkung durch Interferenz an benachbarten schlanken Bauwerken*, Konstruktiven Ingenieurbau Berichte 35, 36 / 1981, 60÷65
- [26] FLAGA A., *Analiza wzdłużnego, poprzecznego i skrętnego oddziaływania na smukłe budowle inżynierskie w ujęciu stochastycznym*, Monografia 22, Politechnika Krakowska, Kraków 1983
- [27] BŁAZIK - BOROWA E., FLAGA A., *Numerical analysis of interference galloping of two identical circular cylinders*, Wind and Structures, Techno-press, vol. I/3 IX/1998, 243÷253
- [28] BŁAZIK - BOROWA E., FLAGA A., *Modelling of aerodynamic loads on a downstream cylinder caused by bistable flow between two circular cylinders*, East European Conference on Wind Engineering Warszawa 1994; vol. I / 149 ÷ 59
- [29] FLAGA A., *Quasi-steady theory in aerodynamics of slender structures*, Sonderforschungsbereich 151 - Tragwerksdynamik, Wissenschaftliche Mitteilungen; Berichte Nr. 25, Ruhr Universität Bochum, 1994
- [30] FLAGA A., *Quasi-steady models of wind load on slender structures. Part 1. Case of a motionless structure*, Archives of Civil Engineering, 1994, XL, 1, 3-28.
- [31] FLAGA A., *Quasi-steady models of wind load on slender structures. Part 2. Case of a moving structure*, Archives of Civil Engineering, 1994, XL, 1, 29-41.
- [32] BĘC J., BŁAZIK-BOROWA E., PODGÓRSKI J. *Metody generowania procesów losowych, opisujących wiatr*, Materiały III Ogólnopolskiego sympozjum Wpływy środowiskowe na budowle i ludzi; obciążenie, oddziaływanie, interakcje, dyskomfort, Politechnika Lubelska 2001, 183÷190
- [33] BĘC J., BŁAZIK-BOROWA E., FLAGA A., PODGÓRSKI J., *Symulacja przepływu wiatru dla mostu im H. Sucharskiego w Gdańsku*, Materiały konferencyjne VIII Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej, Fizyka budowli w teorii i praktyce, Politechnika Łódźka 2001, 23÷30
- [34] BĘC J., BŁAZIK-BOROWA E., BOSAK G., FLAGA A., MICHAŁOWSKI T., PODGÓRSKI J., *Aerodynamika mostu im. H. Sucharskiego w Gdańsku*, Materiały III Ogólnopolskiego sympozjum Wpływy środowiskowe na budowle i ludzi; obciążenie, oddziaływanie, interakcje, dyskomfort, Politechnika Lubelska 2001, 13÷20
- [35] FLAGA A., BOSAK G., MICHAŁOWSKI T., *Study of aerodynamical behaviour of suspension footbridges against wind load*, Proc. of 3<sup>rd</sup> East European Conference on Wind Engineering, Kiev 2002, 76÷80
- [36] BOSAK G., FLAGA A., MICHAŁOWSKI T., *Comparison of horizontal and torsional stiffness of light footbridge under wind action*, Proc. of the 1<sup>st</sup> International Conference on Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, Footbridges 2002, OUTA Paris 2002

+

+

- [37] BOSAK G., FLAGA A., MICHAŁOWSKI T., *Study of aerodynamical behaviour and serviceability limit state of suspension footbridges under wind action*, Proc. of the 11<sup>th</sup> International Conference on Wind Science and Engineering Research Center at Texas Tech University Lubbock 2003, vol. II, 1587÷1594
- [38] FLAGA A., *Półempiryczne modele fenomenów aerodynamicznych i aeroelastycznych przęseł mostów podwieszonych lub wiszących*, Materiały XLV Konferencji Naukowej KILiW PAN KN PZITB 1999 vol. V 69÷86
- [39] *PN-85/S-10030 Obiekty mostowe, obciążenia*
- [40] *PN – 82/S-10052 Obiekty mostowe, konstrukcje stalowe, projektowanie*
- [41] FLAGA A., *Problemy oceny wpływu drgań na ludzi znajdujących się na mostach*, Inżynieria i Budownictwo 4/2002, 182÷187
- [42] FLAGA A., PAŃTAK M., *Kryteria komfortu w projektowaniu kładek dla pieszych*, praca opublikowana w niniejszej monografii
- [43] *BS 5400 Part 2 (1978) Appendix C, Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges*

#### Summary

This paper concerns aerodynamical behaviour of light steel footbridges, which are dynamically susceptible structures. At the beginning, short characteristics of basic aerodynamical phenomena in bridge aerodynamics has been presented. In aerodynamical calculations of footbridges a model of wind actions according to quasi-steady theory has been adopted. Basing upon calculation results, serviceability limit states of the aerodynamical footbridges has been checked.

+