

## Aerodynamiczne tłumienie drgań w obliczeniach stalowych wież kratowych

Marcin Skwarek<sup>1</sup>, Jacek Hulimka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pracownia Projektowa M.Skwarek J.Hulimka Sp. J.,  
e-mail: marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl

<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Budowlanej, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska,  
e-mail: jacek.hulimka@polsl.pl

**Streszczenie:** Obliczanie stalowych wież kratowych sprowadza się przede wszystkim do wyznaczenia odpowiedzi dynamicznej konstrukcji, drgającej w kierunku średniej prędkości wiatru. Te drgania, smukłej i stosunkowo lekkiej konstrukcji, podlegają tłumieniu, nie tylko konstrukcyjnemu, ale także spowodowanemu oporem ośrodka w jakim się odbywają. W odniesieniu do przedmiotowych konstrukcji, fakt występowania drugiego z wymienionych tu czynników tłumiących ujawnił się w praktyce inżynierskiej dopiero poprzez procedury norm Eurokod. Formuły te w wielu przypadkach pozostają jednak mało precyzyjne – stąd zawarte w niniejszym referacie propozycje autorów. Rozbieżności podanych metod ilustruje przykład obliczeniowy.

**Słowa kluczowe:** wieże kratowe, obciążenie wiatrem, tłumienie aerodynamiczne.

### 1. Wprowadzenie

Podatne i lekkie, wolnostojące konstrukcje stalowe, takie jak rozpatrywane tu wieże kratowe, ale także pełnościennie (lub kominy), dla których podstawowe obciążenie zewnętrzne wynika z sił oddziaływania wiatru, narażone są przede wszystkim na drgania powodowane porywami wiatru, których największe amplitudy występują na kierunku jego średniej prędkości, lub inaczej mówiąc w linii średniego kierunku wiatru. Taki naprzemienny ruch konstrukcji powoduje, że zwrot wektora jego prędkości jest odpowiednio zgodny lub przeciwny do zwrotu wektora średniej prędkości wiatru. W tym świetle, wypadkowa prędkość przepływu powietrza wokół konstrukcji jest sumą wektorową nie tylko średniej i pulsacyjnej prędkości wiatru, ale także prędkości ruchu drgającej konstrukcji. Rozpatrywane drgania konstrukcji podlegają zatem tłumieniu nie tylko konstrukcyjnemu, tj. związanemu z właściwościami materiału czy też tarciem lub luzami w połączeniach, ale także wynikającemu z oporów ciągłego ośrodka płynnego (materialnego), za jaki uważane jest powietrze, a w jakim drgania te się odbywają – inaczej tłumieniu aerodynamicznemu.

Opisany wyżej, rzeczywisty schemat wolnostojącej wieży kratowej, przedstawiony dalej na rysunku 1.a), sprowadzić można do układu o jednym stopniu swobody dynamicznej, jak na rysunku 1.b). Dla takiego układu (np. za [1]) równanie ruchu drgań swobodnych, tłumionych, ma postać:

$$\ddot{q}(t) + 2\gamma\omega \cdot \dot{q}(t) + \omega^2 q(t) = \frac{P(t)}{M} \quad (1)$$

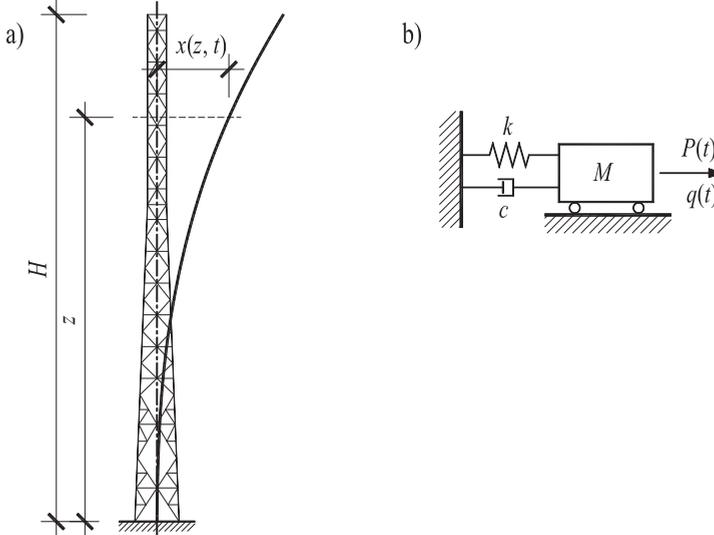
gdzie  $\omega$  jest częstością kołową drgań własnych,  $\gamma$  bezwymiarowym współczynnikiem tłumienia, natomiast  $q(t)$  współrzędną uogólnioną, powiązaną z amplitudą przemieszczeniową dowolnego punktu rozpatrywanej konstrukcji  $x(z, t)$  zależnością (wg [2]):

$$x(z, t) = \Phi_1(z) \cdot q(t) \quad (2)$$

gdzie  $\Phi_1(z)$  jest podstawową (pierwszą) postacią drgań giętych wieży, opisywaną równaniem:

$$\Phi_1(z) = \left( \frac{z}{H} \right)^k \quad (3)$$

gdzie wartość wykładnika  $k$  przyjmowana jest wg [3] dla stalowych wież kratowych  $k = 2,5$  (lecz nie dla wież o skokowo zmiennej sztywności trzonu – przypis autorów).



Rys. 1. Schemat konstrukcji wieży: a) rzeczywisty, b) sprowadzony do układu o jednym stopniu swobody

Siłę wymuszającą  $P(t)$  w równaniu (1), w rozważanym tu przypadku, reprezentuje zmienne w czasie obciążenie wiatrem, działające na jednostkę wysokości wieży, które w ślad za [2] i [4] zapisać można w postaci:

$$P(z, t) = \frac{1}{2} \rho \cdot U_w^2(z, t) \cdot c_f(z) \cdot A_{ref}(z) \quad (4)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością powietrza ( $1,25 \text{ kg/m}^3$ ),  $c_f(z)$  to współczynnik aerodynamiczny (współczynnik łącznej siły oddziaływania wiatru wg [5]) na jednostkę wysokości konstrukcji,  $A_{ref}(z)$  to powierzchnia referencyjna (oddziaływania wiatru) na jednostkę wysokości wieży, natomiast  $U_w(z, t)$  jest wypadkową prędkością przepływu powietrza względem elementów wieży, którą, za [2] i [4], wyrazić można wzorem:

$$U_w(z, t) = U_m(z) + u(z, t) - \dot{x}(z, t) \quad (5)$$

gdzie  $U_m(z)$  jest średnią prędkością wiatru (dla określonego czasu uśrednienia, wg [3] 10 min),  $u(z, t)$  prędkością pulsacyjną wiatru (fluktuacja prędkości wiatru wokół wartości średniej), natomiast  $\dot{x}(z, t)$  jest prędkością ruchu drgającej konstrukcji na określonej wysokości  $z$ .

Przedstawiony wyżej opis, uzupełniony kilkoma, można rzec fundamentalnymi równaniami, wyjaśnia istotę poruszanego tu zagadnienia, a przede wszystkim stanowi podstawę przedstawionych dalej rozważań.

## 2. Aerodynamiczne tłumienie drgań konstrukcji wywołanych porywami wiatru, a regulacje normowe w Polsce

W polskiej praktyce inżynierskiej, przed wprowadzeniem norm Eurokod, a więc przy wykorzystaniu w obliczeniach normy [6] (także z późniejszą poprawką z roku 2009), zjawisko tłumienia aerodynamicznego drgań było pomijane. Wyjątek stanowiły tutaj obliczenia kominów stalowych, dla których w normie [7] podano uproszczony wzór do wyznaczenia (oszacowania) wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań. W artykule [2] przedstawiony został algorytm wyprowadzenia tego wzoru, w którym wychodzi się od przedstawionego na wstępie równania ruchu (1) i podstawianych dalej zależności (4) i (5), z wykorzystaniem (2) i (3). Oczywiście, w przypadku konstrukcji pełnościennej jaką jest komin, powierzchnię referencyjną na jednostkę wysokości konstrukcji  $A_{ref}(z)$  w równaniu (4), zastępuje odpowiednio jego średnica (szerokość) zewnętrzna na jednostkę wysokości  $b(z)$ . Przyjmując dalej dla kominów stałą średnicę oraz wartość współczynnika oporu aerodynamicznego na wysokości, po odpowiednich przekształceniach, w [2] uzyskano następujący wzór, pozwalający wyznaczyć logarytmiczny dekrement tłumienia aerodynamicznego komina w pierwszej postaci:

$$\delta_a = \frac{\rho \cdot U_m(H) \cdot c_f \cdot b}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \quad (6)$$

gdzie  $n_1$  to częstotliwość drgań własnych w pierwszej postaci giętej [Hz], a  $m_e$  jest masą równoważną na jednostkę wysokości konstrukcji [kg/m]; pozostałe oznaczenia jak wyżej.

W normie Eurokod [3], a więc już dla wszystkich rodzajów konstrukcji, podano następujące równanie, definiujące logarytmiczny dekrement tłumienia drgań dla podstawowej (pierwszej) postaci drgań giętych:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (7)$$

gdzie  $\delta_s$  to logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego,  $\delta_a$  logarytmiczny dekrement tłumienia aerodynamicznego, a  $\delta_d$  – logarytmiczny dekrement tłumienia wynikający z zastosowania urządzeń tłumiących (jeśli takie występują). Definicja ta w sposób jawny uwzględnia zatem wpływ tłumienia aerodynamicznego drgań konstrukcji powodowanych porywami wiatru. Oczywiście, wpływ ten będzie istotny tylko dla podatnych i lekkich konstrukcji, jak opisano na wstępie. Dalej, norma [3] dla konstrukcji, w których odkształcenia modalne  $\Phi(z)$  można uznać za stałe na każdej wysokości  $z$  podaje wyrażenie, wg którego można oszacować wartość  $\delta_a$ . Jest to dokładnie wzór (6) podany wyżej. W normie [3] zapisano ponadto, że w przypadku konstrukcji wspornikowych o zmiennym rozkładzie masy, można w przybliżeniu przyjąć masę równoważną  $m_e$  jako równą wartości średniej masy  $m$  [kg/m] z górnej jednej trzeciej części konstrukcji.

## 3. Propozycje w zakresie uwzględniania aerodynamicznego tłumienia drgań w obliczeniach wież kratowych

Pierwsze propozycje autorów, dotyczące obliczania logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań wież kratowych powodowanych porywami wiatru, podane zostały w pracy [8]. Wynikały one z genezy wzoru (6) i potrzeby zastąpienia średnicy zewnętrznej (szerokości) komina  $b$  wartością odpowiednią dla konstrukcji kratowych (z ewentualnym wyposażeniem). Przez analogię do uproszczonego sposobu wyznaczania wartości masy równoważnej podanego w [3] (opisano wyżej), w [8] podano, że w przypadku obliczeń wież kratowych można przyjąć:

$$b = \frac{3 \cdot \Sigma A_{ref}}{H} \quad (8)$$

gdzie  $\Sigma A_{ref}$  oznacza tu łączną powierzchnię działania wiatru (wraz z elementami wyposażenia jeśli one występują) z górnej 1/3 wysokości konstrukcji. Oczywiście przyjęć należy wtedy także średnią wartość współczynnika łącznej siły oddziaływania wiatru  $c_f$ , odpowiednio z tej samej części wysokości wieży.

Dalsza analiza rozpatrywanego tu problemu, a szczególnie zapisów normowych w tym zakresie ujawniła, że przytoczona wyżej, uproszczona metoda wyznaczenia masy równoważnej pozostaje bardzo niedokładną w porównaniu z wartością obliczoną na podstawie wzoru:

$$m_e = \frac{\int_0^H m(z) \cdot \Phi_1^2(z) dz}{\int_0^H \Phi_1^2(z) dz} \quad (9)$$

podanego także w normie [3], szczególnie w przypadku, gdy mamy do czynienia ze skoncentrowaną masą w szczytowej części wieży, pochodzącą od elementów wyposażenia. Różnice wartości, co przedstawia także zamieszczony dalej przykład obliczeniowy, przekraczają nawet 100%. Autorzy zauważają przy tym, że biorąc pod uwagę potrzebę dzielenia w obliczeniach konstrukcji wieży na określoną liczbę  $n$  segmentów (zarówno do celów wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego, jak i rozkładu prędkości wiatru na jej wysokości), wzór (9) zapisać można w prostszej postaci, przydatnej bezpośrednio w zastosowaniach inżynierskich, jako:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n [M_i \cdot \Phi_1^2(z_i) \cdot h_i]}{\sum_{i=1}^n [\Phi_1^2(z_i) \cdot h_i]} \quad (10)$$

gdzie  $M_i$  oznacza masę  $i$ -tego segmentu wieży (wraz z wyposażeniem),  $z_i$  rzędną jego środka ciężkości, a  $h_i$  jego wysokość.

Spróbujmy teraz zestawzić założenia jakie przyjęte zostały w wyprowadzeniu wzoru (6) z rzeczywistymi realizacjami wież kratowych, zwłaszcza tych stosowanych w telekomunikacji i radiodyfuzji, jako najliczniejszych. Autorzy szczególnie mają tu na myśli uproszczone przyjęcie stałej szerokości konstrukcji i współczynnika oporu aerodynamicznego na jej wysokości, ewentualnie zniwelowane nieco poprzez obliczenie wymiaru  $b$  ze wzoru (8). Należy zauważyć, że znacznym uproszczeniem jest też zastosowanie w obliczeniach wg wzoru (6) jednej średniej prędkości wiatru, wyznaczonej dla rzędnej odpowiadającej wierzchołkowi konstrukcji. Patrząc na zamieszczony na rysunku 2 przykładowy widok górnej części wieży telekomunikacyjnej trudno zaakceptować takie uproszczenia, a biorąc pod uwagę także stopień skomplikowania pozostałych procedur normowych [3] i [5] – jeszcze trudniej. Uproszczenia te stają się już zupełnie nie do zaakceptowania w sytuacji, kiedy obliczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego niezbędne jest do opracowania wyników pomiarów charakterystyk dynamicznych wieży, opisanych w pracy [9].



Rys. 2. Przykładowy widok górnej części wieży telekomunikacyjnej i nierównomiernego rozłożenia powierzchni nawietrznych

Biorąc pod uwagę powyższe, autorzy proponują korektę wzoru na logarytmiczny dekrement tłumienia aerodynamicznego drgań wież kratowych, powodowanych porywami wiatru. Wzór taki uzyskać można na podstawie zależności (1) do (5), ponawiając wyprowadzenie opisane w pracy [2], pozostawiając jednak wielkości  $A_{ref}(z)$  i  $c_f(z)$  we wzorze (4) jako zmienne, w funkcji wysokości konstrukcji. Otrzymuje się wyrażenie:

$$\delta_a = \frac{\rho}{2 \cdot n_1} \cdot \frac{\int_0^H U_m(z) \cdot c_f(z) \cdot A_{ref}(z) \cdot \Phi_1^2(z) dz}{\int_0^H m(z) \cdot \Phi_1^2(z) dz} \quad (11)$$

co podobnie jak wcześniej dla wzoru (9), w sposób uproszczony, dedykowany do zastosowań inżynierskich, zapisać można w postaci:

$$\delta_a = \frac{\rho}{2 \cdot n_1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n [U_m(z_i) \cdot c_{f,i} \cdot \Sigma A_{ref,i} \cdot \Phi_1^2(z_i)]}{\sum_{i=1}^n [M_i \cdot \Phi_1^2(z_i) \cdot h_i]} \quad (12)$$

gdzie  $\Sigma A_{ref,i}$  oznacza łączną powierzchnię referencyjną (nawietrzną) w  $i$ -tym segmencie wieży (z uwzględnieniem wyposażenia, jeśli występuje), a  $c_{f,i}$  odpowiednio współczynnik łącznej siły oddziaływania wiatru wg [5] (współczynnik aerodynamiczny) odpowiadający powierzchni  $\Sigma A_{ref,i}$ . Pozostałe oznaczenia podano i opisano wcześniej. Podobne zależności podane zostały w pracach [4] i [10].

Należy tu jeszcze podkreślić, że do przeprowadzenia obliczeń, zarówno wg wzoru (6) z wykorzystaniem zależności (8), jak i wg wzoru (12), niezbędne jest wyznaczenie łącznych powierzchni referencyjnych i odpowiadających im współczynników aerodynamicznych w każdym z wydzielonych segmentów wieży. Tym samym wskazany jest odpowiednio gęsty podział konstrukcji, szczególnie w jej górnej części, w przypadku wież telekomunikacyjnych uwzględniający także rozdzielanie poszczególnych poziomów instalacji systemów antenowych. Praktykowane często w obliczeniach inżynierskich wyznaczenie współczynników dynamicznych jedynie na podstawie powierzchni rzutowej i współczynników oporu aerodynamicznego samej konstrukcji kratowej wieży, w świetle opisanych tu zależności,

zupełnie różni się z uwarunkowaniami fizycznymi zjawisk jakie mają one opisywać. Oczywiście, tematem odrębnym, wykraczającym poza tematykę niniejszej pracy, pozostaje kwestia miarodajnego wyznaczenia wartości współczynników oporu aerodynamicznego, z uwzględnieniem wpływu interferencji aerodynamicznej konstrukcji wieży i elementów wyposażenia.

#### 4. Przykład obliczeniowy

Dla sprawdzenia i zobrazowania rozbieżności wyników obliczeń uzyskiwanych przy zastosowaniu różnych, opisanych wyżej procedur wyznaczenia wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań, przeprowadzono obliczenia sprawdzające. Do tego celu wybrano rzeczywistą, stosunkowo smukłą i dość podatną konstrukcję wieży kratowej  $H = 40$  m, o podstawie trójkąta równobocznego, o szerokości boku w podstawie 3,5 m i 1,5 m na szczycie. Sylwetkę tej wieży prezentuje rysunek 1.a). Obliczenia wykonano zastępczą metodą statyczną wg [5], zakładając lokalizację obiektu w pierwszej strefie obciążenia wiatrem wg [3] (przy rzędnej terenu  $A < 300$  m n.p.m.), w terenie kategorii II. Stosowano przy tym logarytmiczny profil prędkości wiatru wg [3], a współczynnik konstrukcyjny obliczono wg załącznika B [3]. Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań przyjęto  $\delta_s = 0,05$ , natomiast częstotliwość drgań własnych w pierwszej postaci giętnej wyznaczono na podstawie analizy modalnej, w opisanych niżej, kolejnych dwóch schematach. Obliczenia wykonano dla następujących schematów konstrukcji i jej obciążenia:

- schemat A – konstrukcja kratowa wieży bez jakiegokolwiek wyposażenia dodatkowego,
- schemat B – przyjęte dodatkowe wyposażenie wieży o określonych parametrach zastępczych: w segmencie S-2 dodatkowa powierzchnia działania wiatru  $A_A = 4,0$  m<sup>2</sup>, dla której współczynnik aerodynamiczny wynosi  $c_{f,A} = 1,2$  oraz masa  $M_A = 300$  kg; w segmencie S-3 dodatkowa powierzchnia  $A_A = 2,0$  m<sup>2</sup> przy współczynniku  $c_{f,A} = 1,2$  oraz masa  $M_A = 200$  kg.

W każdym z dwóch opisanych schematów rozważono trzy kolejne przypadki, odpowiednio dla różnych metod wyznaczenia wartości logarytmicznego dekrementu aerodynamicznego tłumienia drgań, a mianowicie:

- przypadek 1 – wzór (6) z zastosowaniem zależności (8); masa równoważna wyznaczona w sposób uproszczony wg [3], opisany w pkt. 2,
- przypadek 2 – wzór (6) z zastosowaniem zależności (8); masa równoważna wyznaczona ze wzoru (10),
- przypadek 3 – wzór (12).

Przyjęto przy tym podział konstrukcji na segmenty obliczeniowe determinowany kolejnymi polami krzyżowego układu „X” skratowań głównych (krzyżulców).

Zestawienie uzyskanych wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań w poszczególnych przypadkach i schematach obciążeń, jak również podstawowe wyniki obliczeń statycznych trzonu wieży, zestawiono w poniższej tabeli.

Można tu dodać, że dla schematu A wielkość masy równoważnej wyznaczonej w przypadku 1 wyniosła 100,7 kg/m, natomiast w przypadku 2 – 268,1 kg/m. Dla schematu B było to odpowiednio: 140,7 kg/m oraz 369,7 kg/m. Wynika stąd, że powodem największych rozbieżności wyników obliczeń (w przypadku 1) jest niedokładność wyznaczenia masy równoważnej konstrukcji. Dalsze niezgodności są już efektem opisanych wcześniej uproszczeń w założeniach do wyprowadzenia wzoru (6).

Tabela 1. Zestawienie wybranych wyników obliczeń

schemat przypadek	A			B		
	1	2	3	1	2	3
wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań $\delta_a$	0,081	0,030	0,015	0,137	0,052	0,025
wartość współczynnika konstrukcyjnego $c_{scd}$	0,95	0,97	0,98	0,94	0,97	0,99
przemieszczenie poziome szczytu konstrukcji pod działaniem wiatru $u$ [cm]	13,25	13,55	13,71	20,07	20,67	21,08
największa wartość charakterystyczna siły ściskającej w krawężniku od działania wiatru [kN]	211,1	215,9	218,4	289,5	298,1	304,0

Autorzy chcą tu także zasygnalizować, że w niektórych przypadkach zasadnym będzie posłużenie się obliczonymi, unormowanymi wartościami wektorów własnych dla pierwszej postaci drgań, w miejsce stosowania funkcji (3) z wartością wykładnika  $k = 2,5$  wg [3]. Będzie to szczególnie istotne w przypadku konstrukcji o skokowo (wyraźnie) zmiennej sztywności trzonu. W przedstawionym przypadku obliczeniowym wartości wyznaczone na podstawie analizy modalnej nieznacznie odbiegają od przebiegu funkcji normowej. Korekta funkcji (wartości wykładnika  $k$ ) nie wpływa tu na wyniki obliczeń statyczno – wytrzymałościowych, a wartość  $\delta_a$  zmniejsza się co najwyżej o 0,001.

## 5. Podsumowanie

W referacie omówione zostało ogólnie zjawisko tłumienia aerodynamicznego drgań powodowanych porywami wiatru, lekkich i podatnych konstrukcji wspornikowych. Przedstawione zostały tu regulacje normowe w zakresie uwzględniania tego zjawiska w obliczeniach stalowych wież kratowych oraz ich krytyczna ocena – w świetle omawianych zastosowań. Zamieszczono także propozycję zmodyfikowanego wzoru do obliczania logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań w pierwszej postaci giętej. Różnice omówionych metod zobrazowano przykładem liczbowym.

Jak pokazują przedstawione wyniki przykładowych obliczeń, zastosowanie uproszczonego wzoru (6) wg normy [3] może powodować istotne przeszacowanie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego drgań. Jest to niezmiernie istotne w sytuacji, gdzie obliczona wartość  $\delta_a$  stanowić ma podstawę do opracowania i interpretacji wyników pomiarów dynamicznych konstrukcji (w zakresie doświadczalnego wyznaczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań – opisano w [9]). Natomiast w przełożeniu na wyniki obliczeń statyczno – wytrzymałościowych trzonów wież, rozbieżności te przekładają się już w znacznie mniejszym stopniu. Oczywiście będą one tym większe, im większy będzie udział elementów wyposażenia w łącznej powierzchni referencyjnej, szczególnie w górnych partiach konstrukcji – zależnie też od ich masy. Co jednak istotne, im bardziej uproszczona będzie metoda obliczania  $\delta_a$ , tym mniejsza będzie wartość zastępczego obciążenia wiatrem, a zatem zmniejszony zostanie stopień bezpieczeństwa konstrukcji. W przytoczonym przykładzie obliczeniowym największe różnice wartości wyznaczonych sił wewnętrznych lub przemieszczeń sięgały około 5%. Taki poziom błędu będzie zapewne akceptowalny z punktu widzenia praktyki projektowej, może być jednak znaczący przy ocenie nośności istniejących konstrukcji.

Podsumowując, autorzy proponują uwzględnianie wpływu aerodynamicznego tłumienia drgań wież kratowych powodowanych porywami wiatru, poprzez stosowanie podanego tu wzoru (12) do obliczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia aerodynamicznego

drgań (w pierwszej postaci giętej), zwracając przy tym uwagę na przedstawione w punkcie 3 uwagi dotyczące metodyki obliczeń. Zauważyć także należy, że wzór ten znajdzie zastosowanie również w obliczeniach wież pełnościennych o zmiennym przekroju lub ze skoncentrowanymi elementami wyposażenia o znaczącej powierzchni i/lub masie.

## Literatura

- 1 Lewandowski R. Dynamika konstrukcji budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2006.
- 2 Żurański J. A. Aerodynamiczne tłumienie drgań komina stalowego spowodowanych porywami wiatru. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/96 (1996), s. 111-113.
- 3 PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- 4 Holmes J.D. Along-wind response of lattice towers – II. Aerodynamic damping and deflections. Engineering Structures, vol. 18, No. 7 (1996), s. 483-488.
- 5 PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
- 6 PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
- 7 PN-93/B-03201 Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie.
- 8 Skwarek M., Hulimka J. Wybrane problemy wyznaczania obciążenia wiatrem wież kratowych w ujęciu norm PN-EN. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z.58 (3/11/II) (2011), s. 299-306.
- 9 Skwarek M., Hulimka J. Pomiary charakterystyk dynamicznych jako element projektowania wspomaganego badaniami przy wyznaczaniu obciążenia wiatrem stalowych wież kratowych wg Eurokodu. Politechnika Lubelska, Budownictwo i Architektura Vol.12(2) (2013) s. 275-282.
- 10 Holmes J.D. Wind loading of structures. Taylor & Francis, 2007.

## Aerodynamic damping in the structural analysis of steel lattice towers

Marcin Skwarek<sup>1</sup>, Jacek Hulimka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Pracownia Projektowa M.Skwarek J.Hulimka Sp. J.,  
e-mail: marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*

<sup>2</sup> *Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology, e-mail: jacek.hulimka@polsl.pl*

**Abstract:** Structural analysis of lightweight freestanding structures, such as steel lattice towers, mainly consists of determining the along-wind dynamic response of the vibrating structure. These vibrations are damped not only structurally but also by the aerodynamic forces. In the Polish design practice, aerodynamic damping concept was introduced together with the rules of Eurocode standards. With respect to the lattice towers, in many cases, these rules are inaccurate, therefore the paper contains some suggestions of authors.

**Keywords:** latticed towers, wind loads, aerodynamic damping