

## Opór aerodynamiczny stalowych konstrukcji wież telekomunikacyjnych Aerodynamic resistance of the steel telecommunication towers

Jacek Szafran

*Katedra Mechaniki Konstrukcji, Zakład Niezawodności Konstrukcji  
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź  
e-mail: [jacek.szafran@p.lodz.pl](mailto:jacek.szafran@p.lodz.pl)*

*Department of Structural Mechanics, Chair of Structural Safety,  
Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Technical University of Łódź,  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź*

---

### Streszczenie

Tematem niniejszego opracowania jest obliczeniowe określenie oporu aerodynamicznego wysokich konstrukcji kratowych takich jak wieże telekomunikacyjne. Na przykładzie istniejącej konstrukcji przedstawiono procedury normowe dotyczące współczynnika oddziaływania wiatru wraz z ich szerokim omówieniem i interpretacją uzyskanych wyników. Analizy i obliczenia zostały przeprowadzone dla wieży o wysokości 84 metrów i trójkątnym przekroju poprzecznym. Konstrukcje charakteryzują krawężniki wykonane z okrągłych prętów pełnych i elementy skratowania z kątowników gorącowalcowanych. Określenie współczynnika siły oddziaływania wiatru uwzględniało również drabinę włazowo-kablową umieszczoną w środku przekroju poprzecznego wieży. Wykonano trzy podejścia obliczeniowe wraz z wynikami dla każdego z nich. Osiągnięte rezultaty pozwalają na stwierdzenie, że dobór normowej procedury obliczeniowej powinien być ściśle dopasowany do analizowanej konstrukcji i jej cech charakterystycznych. Informacje zawarte w artykule są szczególnie przydatne w przypadku określania nośności istniejących konstrukcji wieżowych na podstawie norm europejskich.

### Abstract

Computational determination of the aerodynamic resistance for high truss structures like telecommunications towers is the subject of this study. Normalized procedures were presented with the example of an existing structure concerning the total wind coefficient. The results of calculations along with their broad elaboration and interpretation have been obtained. Analyses and calculations were conducted for a tower of height equal to 84 metres and of a triangular cross section. Structure is characterized by round full rods as the legs of the tower and hot-rolled angle bars as the bracing. Determination of the total wind coefficient involved the climbing-cable ladder placed at the centre of the cross section of the tower. Three computational approaches were implemented obtaining the results for each of them. Achieved results allow for stating that selection of a computational standard procedure should be adequate to the analysed structure and its characteristic features. Information included in the article is particularly useful in case of determining the carrying capacity of existing tower structures on the base of Eurocode standards.

*Słowa kluczowe: opór aerodynamiczny, współczynnik siły oddziaływania wiatru, wieża telekomunikacyjna, element wyposażenia*  
*Keywords: aerodynamic resistance, total wind force coefficient, telecommunication tower, linear ancillary item*

---

### 1. Wstęp

Wprowadzenie w ostatnim czasie do polskich unormowań prawnych europejskich norm projektowych spowodowało duże zmiany w określaniu nośności poszczególnych obiektów budowlanych. Analiza nośności obiektów istniejących w oparciu o aktualne przepisy w dalszym ciągu nastrocza problemów projektantom i rzeczoznawcom budowlanym. Wynika to z faktu, że zmianie uległy nie tylko koncepcje określania nośności poszczególnych elementów konstrukcji ale także sposób formułowania ich obciążenia. W sposób szczególny dotyczy to analizy przydatności do dalszego użytkowania obiektów zaprojektowanych kilka lub kilkanaście lat temu, na podstawie zupełnie innych wymagań i procedur normowych. Typowym przykładem takiej sytuacji mogą być stalowe konstrukcje wież telekomunikacyjnych.

Przy niebywale szybko rozwijającym się rynku usług teleinformatycznych, ciągle zmieniającym się wymaganiami sprzętowym a także potrzebom społecznym operatorzy telefonii cyfrowej ciągle modyfikują swoje urządzenia

### 1. Introduction

Introduction of European standards in recent time in the Polish regulations caused great changes in the determination of carrying capacity of individual civil structures. Analysis of the carrying capacity with respect to current provisions is still a challenging problem for designers and building surveyors. It results from the fact that not only concepts of determination of the carrying capacity of individual structural elements changed but the way the load is formulated changed as well. There are particular situations where objects designed a dozen years ago, based on completely different requirements and standard procedures must be recalculated again. Steel structures of telecommunications towers are a typical example of such a situation.

Rapidly growing market for telecommunication services along with new hardware requirements and social needs are the signs of our time. Therefore, mobile telecommunication operators are constantly modifying their infrastructure and electronic devices due to this demanding situation. Considering

telekomunikacyjne. Do tych urządzeń możemy zaliczyć wszelkiego rodzaju anteny nadawcze, moduły radiowe itp. Wszystkie tego typu urządzenia umieszczane są na konstrukcjach wsporczych jakimi są wieże telekomunikacyjne. Każdorazowa zmiana wyposażenia telekomunikacyjnego wpływa na sposób i wielkość obciążenia budowli a także na jej parametry aerodynamiczne co wiąże się z koniecznością sprawdzenia nośności takiej konstrukcji wieżowej.

Niniejsze opracowanie w całości poświęcone jest na wyznaczaniu oporu aerodynamicznego konstrukcji wieżowych na podstawie formuł zawartych w normach [1, 3].

## 2. Opis problemu

W sensie ogólnym współczynnik oporu aerodynamicznego (czy też współczynnik oddziaływania wiatru) zależy wg [4] od: kształtu przekroju poprzecznego prętów konstrukcji kratowej, ich smukłości, kształtu przekroju poziomego wieży oraz kierunku działania wiatru względem ścian wieży. W przypadku wież telekomunikacyjnych, dla których konieczne jest wyznaczenie oporu aerodynamicznego problem wydaje się być bardziej złożony. Dla obiektów wieżowych wykonanych z różnego rodzaju profili, obciążonych drabinami kablowymi i włazowymi, antenami i ich konstrukcjami wsporczymi prawidłowe oszacowanie oporu aerodynamicznego jest zadaniem wymagającym. Należy uwzględnić interakcje elementów konstrukcyjnych i elementów wyposażenia, ich wzajemne przesłanianie a także różne modele opływu elementów o krawędziach ostrych lub okrągłych.

Określenie współczynnika aerodynamicznego wg normy [3] szeroko omówione w publikacji [4] stanowiło stosunkowo prostą procedurę. Podstawowym parametrem jest współczynnik wypełnienia jednej ściany kratownicy przestrzennej opisany wzorem:

$$\varphi = \frac{F + F_L \cdot 0,6}{S}, \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – powierzchnia rzutu wszystkich elementów konstrukcyjnych ściany (prętów i blach węzłowych) na płaszczyznę prostopadłą do kierunku działania wiatru,  $F_L$  – powierzchnia rzutu liniowego elementu wyposażenia wieży (drabiny),  $S$  – powierzchnia rzutu obrysu rozpatrywanej ściany. Do dalszych rozważań przyjmijmy oznaczenia ścian wieży oraz kierunek działającego wiatru jak na Rys. 1.

telecommunication equipment and hardware, we can take devices like radio modules, panel antennas, microwave dishes and etc. All such installations are mounted on support structures like telecommunication towers. Every modification of such equipment affects main structure characteristic parameters such as magnitude of loading, aerodynamic factors and etc. It provides a necessity for recalculations of the tower carrying capacity.

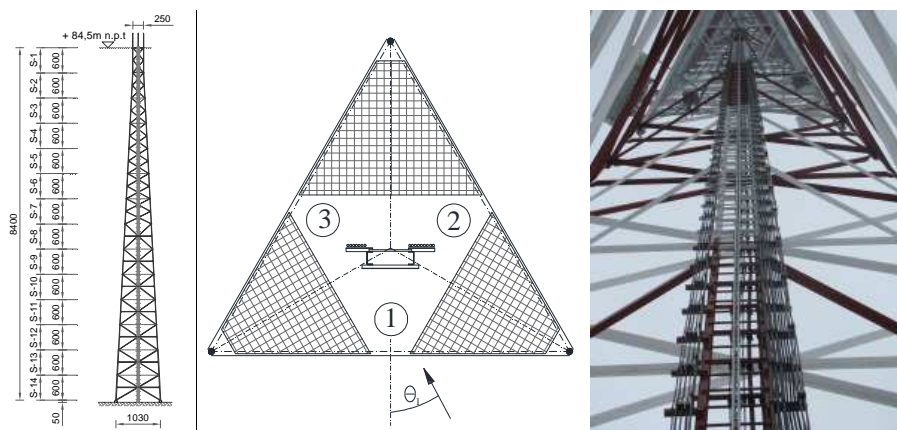
The study is devoted to the computational determination of the aerodynamic resistance of tower telecommunication structures based on the formulae included in standards [1, 3].

## 2. Problem description

In general sense the coefficient of aerodynamic resistance (or total wind force coefficient as well as wind drag) depends on [4]: on the shape of the cross section of bars of the lattice structure, their slenderness, the shape of the horizontal section of the tower and direction of the wind relative to walls of the object. In case of the telecommunication towers with higher complexity (e.g. flat-sided and circular-section members), calculation problem of aerodynamic resistance seems to be more challenging. For towers made from profiles of different kind, loaded with cable and climbing ladders, other linear ancillaries, antennas and their support structures, correct estimation of the aerodynamic resistance is a demanding task. One should include interactions of structural elements and accessories, their mutual shielding effect as well as different flow patterns of elements of flat sided or circular edges.

Determination of the aerodynamic coefficient according to standard [3] which is widely described in the publication [4], was a relatively simple procedure. Solidity ratio of one (usually front) face of the spatial truss is a main parameter in this approach. It should be described as follows:

where:  $F$  is shadow area (area of the solid members in the appropriate face) of every structural element of the front face, on a plane normal to the wind direction,  $F_L$  – shadow area of the linear ancillaries of the tower,  $S$  – area of the considered contour (elevation). For further deliberations let us assume labels of faces of the tower and direction of the acting wind as shown in Fig. 1.



Rys. 1. Schemat statyczny, przekrój poziomy wieży i kierunek działającego wiatru, drabina włazowo-kablowa umieszczona centralnie w trzonie wieży.

Fig. 1. Static scheme, tower cross section and the direction of the acting wind, feeder and climbing ladders placed at the centre of the tower.

Dla przypadku wieży o pasach z elementów rurowych i skratowania z kształtowników współczynnik oporu aerodynamicznego wyrażony jest wg [3] wzorem:

$$c_f = 3,5 - 4,0 \cdot \varphi, \quad 0 < \varphi < 0,37. \quad (2)$$

Podobne rozważania można przeprowadzić wg normy [1]. Jednak należy podkreślić, że stopień ich skomplikowania jest zdecydowanie większy.

Autor publikacji [5] zaleca rozpatrywać trzy podejścia obliczeniowe dla różnych układów konstrukcji wieżowych:

- symetryczne konstrukcje bez elementów wyposażenia,
- symetryczne konstrukcje z ograniczonymi (niewielkimi) elementami wyposażenia,
- konstrukcje zawierające elementy wyposażenia.

Norma [1] określa zależność dla współczynnika łącznej siły oddziaływania wiatru jako:

$$c_f = c_{f,S} + c_{f,A}, \quad (3)$$

gdzie:  $c_{f,S}$  – współczynnik oddziaływania wiatru na sekcje konstrukcji prętowej wyznaczony przy użyciu  $\varphi$ ,  $c_{f,A}$  – współczynnik siły oddziaływania wiatru na wyposażenie. W normie [1] istnieją również wytyczne dotyczące przypadków specjalnych – konstrukcji zawierających elementy wyposażenia i trójkątnym przekroju poziomym opisane zależnością:

$$c_f = c_{1e} \cos^2\left(\frac{3\Theta_1}{4}\right) + c_{2e} \sin^2\left(\frac{3\Theta_1}{4}\right). \quad (4)$$

Symbole  $c_{1e}$ ,  $c_{2e}$  oznaczają współczynniki efektywnych sił oddziaływania wiatru, natomiast  $\Theta_1$  – kąt natarcia wiatru względem normalnej do ściany 1, w rzucie poziomym.

### 3. Analizowana konstrukcja

Analiza została przeprowadzona na podstawie istniejącej wieży telekomunikacyjnej zilustrowanej na Rys. 1 o wysokości 84 metrów. Konstrukcja podzielona jest na 14 segmentów. Schematem statycznym trzonu jest wspornik kratowy utwierdzony w gruncie poprzez fundamenty.

Pionowe elementy nośne (krawężniki) zostały wykonane z okrągłych prętów pełnych, natomiast elementy skratowania z gorącowalcowanych kątowników. Drabina kablowo – włazowa usytuowane jest centralnie wewnątrz trzonu wieży. Wykonana jest z ceowników zimnogiętych połączonych szczeblami z prętów okrągłych po jednej stronie i wspornikami drabiny kablowej po stronie drugiej tak jak zostało to zaprezentowane na Rys. 1.

### 4. Wyniki obliczeń

W celu jasnej prezentacji wyników przeprowadzonych obliczeń przyjmuje się następujący podział podejść obliczeniowych:

- 1) opisane wzorem (2),
- 2) opisane wzorem (3),
- 3) opisane wzorem (4).

Na Rys.2 przedstawiono w formie wykresu wartości obliczanych współczynników dla wszystkich sekcji konstrukcji wieżowej. Wszystkie prezentowane dane uzyskano dla  $\Theta_1=0^\circ$ . Warto zaznaczyć, że w podejściu 2 wartość współczynnika  $c_{f,A}$  została określona z iloczynu:  $K_A c_{f,A,0}=1,6$  gdzie  $c_{f,A,0}=2,0$  (dla elementów płaskich i płytowych) i  $K_A=0,8$  (dla elementów wyposażenia wewnątrz trzonu wieży).

For the tower with circular-section legs and flat-sided braces, coefficient of aerodynamic resistance is described by formula given in [3]:

Similar considerations can be carried-out according to the norm [1]. However, one should emphasize that the degree of their complexity is definitely greater.

The Author of the book [5] recommends to consider three computational approaches for different systems of tower structures:

- symmetrical structures without ancillaries,
- symmetrical structures with limited ancillaries,
- structures containing ancillaries.

Standard [1] describes the total wind force coefficient as follows:

where:  $c_{f,S}$  – is the wind force coefficient of the bare structure section determined using solidity ratio  $\varphi$ ,  $c_{f,A}$  – wind force coefficient of the ancillaries. In the standard [1] there are guidance for special structures – for towers with triangular cross section where consisting linear ancillaries coefficient is described as follows:

Factors  $c_{1e}$  and  $c_{2e}$  denote effective wind force coefficients and  $\Theta_1$  stands for the plan angle of acting wind to the normal to face 1.

### 3. Analyzed structure

Analysis has been performed on the basis of the existing telecommunication tower illustrated in Fig. 1 of height equal to 84 meters. The construction is divided into 14 sections. The static scheme of such a structure is a spatial truss fixed in ground by foundations.

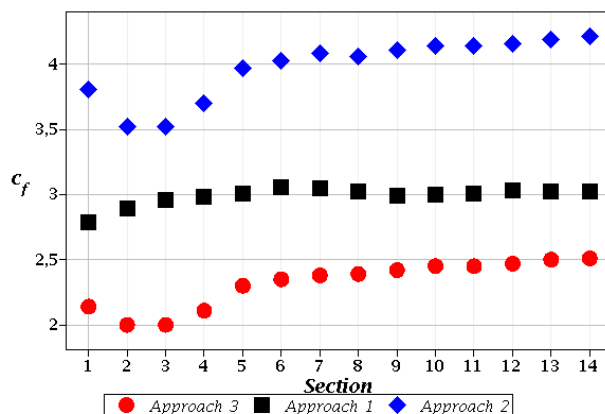
Leg members of the tower (the main load-bearing components) consist of circular full rods and primary bracing members with hot-rolled angle bars. Feeders – climbing ladder (linear ancillary) is placed centrally inside of the tower. Ladder is made of two vertically situated cold-formed C-bars connected by circular rods at one end, and with brackets for feeders and cables at the other end as it is presented in Fig. 1.

### 4. Results of the calculations

To present the results of the performed analyses and calculations, computational approaches were divided in the following manner:

- 1) described by formula (2),
- 2) described by formula (3),
- 3) described by formula (4).

Fig. 2 presents the plot of wind drag coefficients calculated for every section of the analyzed tower structure. Presented values were obtained for  $\Theta_1=0^\circ$ . It is worth to emphasize the fact that, in the approach described by formula (3), the value of the  $c_{f,A}$  coefficient was obtained as a product of  $K_A c_{f,A,0}=1,6$ , where  $c_{f,A,0}=2,0$  (flat – sided sections and plates) and  $K_A=0,8$  (reduction factor for ancillary items placed into the internal part of the tower).



Rys. 2. Wyniki współczynnika aerodynamicznego  $c_f$  dla poszczególnych segmentów rozpatrywanej wieży.  
 Fig. 2. Coefficient of the aerodynamic resistance  $c_f$  for individual sections of the analyzed tower.

**5. Wnioski**

Przeprowadzone obliczenia pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- na Rys. 2 można zauważyć, że wybór metody obliczeń ma znaczny wpływ na wartości współczynnika  $c_f$  dla poszczególnych segmentów analizowanej konstrukcji wieżowej,

- podejście 1) wg normy [3] zostało przedstawione jedynie w celach porównawczych,

- w przypadku analiz wież o złożonej konstrukcji, różnych przekrojach poprzecznych elementów nośnych, wyposażonych w drabiny kablowe i włazowe, konstrukcje wsporcze anten należy korzystać z podejścia 3) opisanego w normie [1] jako przypadki specjalne,

- zależności zastosowane w podejściu 3) zostały wprowadzone do normy [1] w celu umożliwienia obliczeń dla różnego typu konstrukcji (z elementami płaskimi i okrągłymi) wraz z uwzględnieniem współczynnika osłonięcia,

- określenie  $c_f$  na podstawie nie prawidłowego podejścia obliczeniowego prowadzi do przeszacowania wartości obciążenia średniego wiatrem konstrukcji co ma kluczowy wpływ na wyniki analiz nośności istniejących konstrukcji,

- uzyskane wyniki wg podejścia 3) dobrze korelują z tymi zaprezentowanymi w publikacji [5],

- rozpatrując opór aerodynamiczny konstrukcji wieżowych należy pamiętać o wnioskach zawartych przez Nielsena w pracy [2], mówiących że wyniki uzyskane dla testów konstrukcji kratowych w skali naturalnej są mniejsze niż te, które mogą być uzyskane za pomocą przybliżonych obliczeń według norm projektowych [1, 3].

**Literatura • References**

[1] Eurokod 3, (2008), *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

[2] Nielsen M.G., (2001), *Wind tunnel tests*. Meeting of IASS Working Group 4: Tower and masts, Oslo, September 2001.

[3] PN-B-03204:2002, (2002), *Konstrukcje stalowe. Wieże i maszty. Projektowanie i wykonanie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

[4] Rykaluk K., (2004), *Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

[5] Smith B.W., (2007), *Communication structures*. Thomas Telford Publishing, London.

**5. Conclusions**

Performed calculations allow for expressing the following conclusions:

- in Fig. 2 we can observe that the choice of the presented method of calculations has a large impact on the value of the  $c_f$  coefficient for individual sections of the analyzed tower structure,

- approach 1) according to the standard [3] was introduced for comparative purposes,

- analyses of the towers of high complexity, the combination of flat-sided and circular-section members, containing feeders and ladders, antennas and their support structures should be based on the approach 3) described in the standard [1] as special cases,

- formulae adopted in approach 3) have been introduced into norm [1] to cover any combination of flat-sided or circular- section members along with a shielding factor as well,

- determination of the wind drag coefficient with respect to the incorrect calculation approach can lead to the overestimation of the mean wind value which has crucial impact on the results of analyses of the carrying capacities of existing structures,

- the results that have been obtained according to approach 3) correlate well with the ones presented in publication [5],

- considering aerodynamic behavior of the tower structures it is worth to underline the fact that the full-scale measurements (given by Nielsen in [2]) showed that the wind resistance of lattice towers should be significantly lower than the estimated ones conducted according to the norms [1,3].