

WPŁYW KSZTAŁTU WIEŻOWCÓW NA JAKOŚĆ KONSTRUKCJI

Zenon Rychter

Wydział Architektury, Politechnika Białostocka, ul. O. Sosnowskiego 11, 15-893 Białystok
E-mail: rychter@pb.edu.pl

TALL BUILDING SHAPE EFFECT ON STRUCTURAL EFFICIENCY

Abstract

The paper analyses the effect of shape of tall buildings on their structural efficiency under dynamic wind loading. Towers having circular-tube cross section were studied. Classical silhouettes of buildings were considered, such as cylinder and pyramid, along with novel forms including inverted pyramid, cucumber, and hourglass. The structural quality measure used was the fundamental frequency of free vibrations. Dynamic finite element analysis has been performed. Hierarchy of tower silhouettes in terms of their structural efficiency has been established. Pyramid-like natural, classic shapes have been found structurally superior. Inverted pyramid and cucumber are the worst shapes. The paper can assist the architect in the conceptual shape design of tall buildings by showing which shapes are structurally efficient and which are not, and why.

Streszczenie

Praca zawiera analizę wpływu kształtu sylwetki wieżowców na jakość ich konstrukcji przy dynamicznym obciążeniu wiatrem. Zbadano wieżowce o przekroju rury kołowej. Rozpatrzono budynki o klasycznych sylwetkach cylindra i piramidy oraz nowe propozycje w formie odwróconej piramidy, ogórka i klepsydry. Jakość konstrukcji oceniono na podstawie fundamentalnej częstości drgań własnych. Obliczenia dynamiczne wykonano metodą elementów skończonych. Ustalono hierarchię konstrukcyjnej jakości sylwetek wieżowców. Najlepsze okazały się sylwetki piramidalne, naturalne, klasyczne. Formy najgorsze to odwrócona piramida i ogórek. Wyniki pracy mogą być przydatne architektom w koncepcyjnym projektowaniu architektonicznym form wieżowców, pokazując, jakie formy są efektywne, a jakie nie i z jakiego powodu.

Keywords: tower-building architecture; silhouette shaping; structural efficiency

Słowa kluczowe: architektura wieżowców; kształtowanie sylwetki; efektywność konstrukcji

WPROWADZENIE

Wacław Zalewski napisał, że kształt decyduje o jakości konstrukcji budowlanej. Znalezienie dobrego kształtu winno być główną troską architekta i konstruktora¹. Stwierdzenie to jest szczególnie istotne w odniesieniu do budynków ekstremalnych, jakimi są budynki wysokie, wieżowce, drapacze chmur.

Kształty historycznych oraz zrealizowanych współcześnie i projektowanych drapaczy chmur można znaleźć w opracowaniu² oraz w obszernej, liczącej tysiące obiektów światowej bazie danych wieżowców³. Dominują tu sylwetki naturalne, klasyczne – cylindry o stałej szerokości oraz formy piramidalne, szersze

¹ A. Allen, W. Zalewski, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ 2010, s. 622.

² Skyscraper, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 01-05-2013].

³ World's Tallest Buildings 2013, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=200> [dostęp: 01-05-2013]

u podstawy, zwężające się w kierunku szczytu budowli. W naturze tak wyglądają pnie drzew i ich konary, nasze palce i kończyny – ogólniej, twory pracujące jak wspornikowe belki zginane poprzecznym obciążeniem. Wedle najprostszego modelu matematycznego wieżowiec to wspornik zginany obciążeniem wiatrem⁴. Podobieństwo kształtów wysokich budowli i pni wysokich drzew jest więc oczywiste.

Niektóre współczesne realizacje i projekty wieżowców proponują kształty zaskakujące, zasadniczo odmienne od kształtu pnia drzewa, najszerszego u podstawy, zwężającego się ku górze. Skrajnym przypadkiem jest odwrócona piramida, największa u podstawy, najszersza w wierzchołku⁵. Mniej zaskakuje kształt 'ogórka', najszerszy w połowie wysokości budynku, mający teoretyczne uzasadnienie w teorii kratownic Michella⁶. Ogórek projektu Normana Fostera zbudowano w Londynie⁷. Formę klepsydry, szerokiej u podstawy i w wierzchołku, zwężonej w środku wysokości ma warszawski Warsaw Spire⁸. Sylwetka klepsydry jest przeciwieństwem sylwetki ogórka.

Różnorodność kształtów wieżowców, a zwłaszcza pojawienie się kształtów nowatorskich, istotnie odbiegających od form natury i form klasycznych wysokich budowli, jest powodem podjęcia w niniejszej pracy problemu zależności między kształtem wieżowca a jakością konstrukcji. Badanie polega na ocenie jakości szeregu reprezentatywnych kształtów - klasycznych i nowatorskich - i ustaleniu ich hierarchii.

W budynkach dostatecznie wysokich zasadniczym obciążeniem jest działanie wiatru, które rośnie dramatycznie z wysokością budowli⁹. Wiatr powoduje nie tylko znaczne statyczne odchylenie budowli od pionu, ale może także wprawić budynek w drgania poprzeczne do kierunku wiatru. Drgania te mogą być przyczyną złego samopoczucia użytkowników wysokich kondygnacji, choroby lokomocyjnej. Gdy częstość drgań koreluje z prędkością wiatru, budynek może wpaść w nasilające się, niebezpieczne dla konstrukcji drgania rezonansowe¹⁰.

Zastosowane w pracy kryterium, miara jakości konstrukcji, to fundamentalna (minimalna) częstość drgań własnych budowli. Wedle tego kryterium lepsza konstrukcja ma wyższą fundamentalną częstość drgań

własnych, wykonuje więcej drgań w jednostce czasu, ma krótszy okres drgań. Wprawienie takiej konstrukcji w niebezpiecznie nasilające się drgania rezonansowe wymaga wiatru o wyższej prędkości, jest więc trudniejsze¹¹.

Obliczenia jakości konstrukcji wieżowców o różnych kształtach wykonano metodą elementów skończonych, programem CALCULIX¹². Na tej podstawie ustalono hierarchię kształtów budynków wysokich. W świetle przyjętego w pracy kryterium jakości najlepsze okazały się kształty klasyczne, naturalne, podobne do piramidy. Nowe kształty w postaci odwróconej piramidy i ogórka okazały się najgorsze. Klepsydra także zajęła miejsce pod koniec hierarchii.

W pierwszej części pracy przedstawiono uproszczone modele-projekty konstrukcji wieżowców, dostosowane do celów prowadzonej w pracy analizy porównawczej jakości konstrukcji różniących się sylwetką. Porównywanie dwóch lub więcej konstrukcji nie wymaga dokładnego zaprojektowania każdej z nich, gdyż parametry wspólne dla wszystkich kandydatów nie mają istotnego wpływu na wynik porównania; parametrom tym można przypisać wartości umowne, bez szczegółowego wymiarowania konstrukcji. W tej części pracy opisano też model obliczeniowy badanych konstrukcji w metodzie elementów skończonych.

W drugiej części pracy przedstawiono wyniki obliczeń jakości konstrukcji budynków wysokich o różnych kształtach oraz opracowaną na tej podstawie hierarchię jakości kształtów.

1. UPROSZCZONE PROJEKTY WIEŻOWCÓW I MODEL OBLICZENIOWY

1.1. Geometria budynków

Przedmiotem analizy porównawczej jest siedem wieżowców, o kształtach i wymiarach przedstawionych w Tabeli 1.

Najprostsze badane kształty budynków to cylinder, ścięta piramida i piramida ścięta odwrócona. Budynek jest albo jednym segmentem o prostym kształcie, albo zestawem dwóch prostych segmentów, każdy o wysokości połowy budynku. Złożone odmiany piramidy to cylinder zwieńczony piramidą oraz

⁴ M. Salvadori, *Why buildings stand up*, W.W. Norton & Company, New York 1990, s. 120.

⁵ A. Allen, W. Zalewski, op. cit., s. 488.

⁶ Ibidem.

⁷ *30 St Mary Axe*, http://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe.

⁸ *Warsaw Spire*, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?buildingID=89012>.

⁹ M. Salvadori, op. cit., s. 116.

¹⁰ P.A. Irwin, *Vortices and tall buildings: A recipe for resonance*, http://www.math.lsa.umich.edu/~krasny/math654_irwin.pdf [dostęp: 01-05-2013].

¹¹ Ibidem.

¹² *CALCULIX*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Calculix>.

Tabela 1. Geometria budynków

Nazwa	piramida zwieńczona cylindrem	piramida	piramida odwrotna	ogórek	klepsydra	cylinder zwieńczony piramidą	cylinder
Kształt	 / \	/ \	\ /	/ \	\ /	/ \	
Wysokość [m]	100						
Średnica górną [m]	20	20	40	20	40	20	40
Średnica w połowie [m]	20	30	30	40	20	40	40
Średnica podstawy [m]	40	40	20	20	40	40	40
Grubość rury [cm]	100	83	83	83	83	71	63

Źródło: opr. własne

piramida zwieńczona cylindrem. Charakterystyczne, nowe kształty złożone, odmienne od piramidy to ogórek i klepsydra. Rozważany zbiór konkurencyjnych budynków jest wystarczająco zróżnicowany na potrzeby tej pracy. Kształty wieżowców są proste lub złożone. Kontury są prostoliniowe lub załamane, wypukłe lub wklęsłe.

Wszystkie budynki są rurami, gdyż rura jest najbardziej efektywnym – sztywnym i wytrzymałym – przekrojem budynku wysokiego, rozpatrywanego jako zginany wiatrem wspornik^{13,14}. Wybrano rury kołowe, jako najprostsze, maksymalnie symetryczne. Budowle mają wspólną wysokość - 100 m. Średnica maksymalna budynków wynosi 40 m. Średnica minimalna to 20 m. Sylwetki budynków różnią się położeniem średnicy maksymalnej i minimalnej na wysokości budynku.

Wszystkie konstrukcje mają jednakową objętość identycznego materiału, identyczną masę. Z tego powodu rury o różnych sylwetkach mają różną grubość ściany. Budowle uszeregowano w tabeli 1. z lewa na prawo malejąco wedle grubości ściany - od grubości największej, równej 100 cm, do najmniejszej, równej 63 cm.

Cechy wspólne badanych konstrukcji zostały maksymalnie uproszczone, gdyż nie wpływają one na hierarchię jakości kształtów. Z tego względu zastosowano najprostsze, pełne ściany rur, choć w rzeczywi-

stych budynkach ściany są szkieletowe, ramowe lub kratowe¹⁵. Przyjęte rury mają stałą grubość w budynku, różną w różnych budynkach. W realnych projektach grubość elementów konstrukcji ścian istotnie wzrasta w kierunku podstawy wieżowca. Przyjęte modele wieżowców to puste rury. Rzeczywiste budynki mają wewnątrz stropy, a często także słupy. Elementy te nie mają jednak istotnego wpływu na sztywność wieżowca na zginanie, interesującą w tej pracy.

Realny projekt konkretnego budynku musi być dokładnie zwymiarowany, by spełnić wszystkie wymagania normowe. W koncepcyjnej analizie porównawczej kilku projektów ważne są proporcje parametrów konkurencyjnych projektów, a nie wartości bezwzględne parametrów, wymiarowanie normowe nie jest więc konieczne. Różnice kształtów badanych wieżowców reprezentowane są przez stosunki średnic rur na różnych wysokościach. Wartości bezwzględne średnic oraz wysokości budynków nie są istotne w tej pracy. Jej wynik, hierarchia kształtów wieżowców, nie zmieni się, gdy budynki zostaną podwyższone lub ich proporcje zostaną zmodyfikowane.

1.2. Model obliczeniowy

Zasadą tej pracy jest możliwie najprostsze modelowanie. Prostota modelu obliczeniowego jest względna, zależy od celu obliczeń, przyjętego środowiska obliczeń

¹³ M. Salvadori, op. cit., s. 122.

¹⁴ Skyscraper, op. cit.

¹⁵ Ibidem.

i dostępnych w nim obiektów i narzędzi. Celem obliczeń jest ustalenie fundamentalnej (najniższej) częstości drgań własnych (swobodnych) budynków. Owa częstość jest miarą jakości konstrukcji. Obliczenia częstości fundamentalnej wykonano komputerowo, numeryczną metodą elementów skończonych, programem CALCULIX¹⁶. W programie tym sporządzono także model geometryczny. W metodzie elementów skończonych konstrukcja dzielona jest na małe 'cegiełki', elementy skończone, będące wydłużonymi prętami, cienkimi płytami lub krępyimi bryłami. Ruch siatki węzłów położonych na granicach elementów skończonych definiuje zachowanie konstrukcji pod obciążeniem.

Program CALCULIX umożliwia wykonanie trzech różnych modeli geometryczno-obliczeniowych badanych konstrukcji. Pierwszy model jest geometrycznie jednowymiarowy (1D). Budynek wysoki jest tu wspornikowym prętem, zbudowanym z prętowych (belkowych) elementów skończonych. Model ten – jedyny praktyczny model w obliczeniach tradycyjnych, ręcznych - odrzucono, gdyż kłopotliwe jest w nim modelowanie przekrojów rurowych o zmiennej średnicy. Odrzucono także model drugi, w pełni trójwymiarowy (3D), gdyż rozważane konstrukcje nie są krępe, bryłowe. Biorąc pod uwagę fakt, że badane wieżowce są cienkościennymi rurami, zastosowano model dwuwymiarowy (2D). Konstrukcja jest tu cienką powłoką, złożoną z wielu płaskich, płytowych elementów skończonych, pracujących na ściskanie/rozciąganie i zginanie/skręcanie. W formule modelu 2D powierzchnię rury łatwo jest utworzyć przeciągając okrąg wzdłuż osi budynku. Model ten bardzo dokładnie opisuje różne zachowania budynku wysokiego - nie tylko zginanie, ale np. płaszczenie się zbyt cienkiej rury w trakcie drgań wywołanych wiatrem (owalizacja przekroju). W tej pracy interesujące jest tylko zginanie całego budynku jako wspornika.

Materiał konstrukcji wszystkich budynków jest taki sam. Przyjęto najprostszy możliwy model materiału. Jest to materiał jednorodny (identyczny wszędzie w budynku) i izotropowy (o własnościach identycznych we wszystkich kierunkach). Materiał jest sprężysty, podlegający prawu Hooke'a. Przyjęto następujące wartości parametrów materiałowych:

- gęstość 2500 kg/m³,
- moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga, sztywność przy ścisaniu/rozciąganiu) 3·10⁹ kG/m²,
- współczynnik Poissona 0,16.

Są to parametry typowego betonu konstrukcyjnego. Przyjęcie innych wartości parametrów nie zmienia wyników prowadzonej w pracy analizy porównawczej. Wyniki te są ważne dla dowolnego materiału sprężystego (materiału Hooke'a). Wyniki są też ważne dla konstrukcji kratowych, ramowych i rur perforowanych, gdyż strukturę kraty, rami i powłoki perforowanej można traktować jak zginaną rurę ciągłą o odpowiednio dobranych stałych materiałowych, stałe materiałowe zaś są w tej pracy bez znaczenia.

Wszystkie budynki są sztywno zamocowane w podłożu: ich dolne krawędzie mają zerowe przemieszczenia i obroty we wszystkich kierunkach.

2. WYNIKI OBLICZEŃ I WNIOSKI

Największym wyzwaniem dla bezpieczeństwa budynków wysokich jest odporność na działanie wiatru, nasilające się z wysokością obiektu¹⁷. Wedle definicji inżynierskiej za budynek wysoki można uznać taki, w którym dominuje obciążenie wiatrem¹⁸. Pod wpływem wiatru budynek nie tylko odchyła się statycznie od pionu w kierunku parcia wiatru, ale może też wpaść w nieprzyjemne dla użytkowników wysokich pięter drgania poprzeczne do kierunku wiatru¹⁹. Drgania te stają się niebezpieczne, rezonansowe, o amplitudzie narastającej jak w huśtawce, gdy odbywają się z częstością odrywania wirów powietrza od boków budynku. Budynek jest olbrzymim, zginanym wspornikiem. Konstrukcja budynku jest tym lepsza, im wyższa jest jej sztywność na zginanie.

Prostą miarą jakości wieżowca - jego odporności na oscylacyjne kołysanie się i rezonans z wiatrem, jego dynamicznej sztywności przy zginaniu - jest fundamentalna (minimalna) częstość drgań własnych, drgań swobodnych budynku²⁰. Budynek, podobnie do napiętej struny, może drgać na teoretycznie nieskończenie wiele sposobów. Możliwe oscylacje tworzą spektrum fal o różnych częstościach drgań, tym wyższych, im krótsza, bardziej pożądana jest fala, w którą wygina się budynek. Fala najdłuższa, o najmniejszej częstości, zwanej częstością fundamentalną, reprezentuje chwianie się całego budynku. Oscylacje takie powstają najłatwiej przy najniższej prędkości wiatru – stąd ich fundamentalne znaczenie dla komfortu użytkowania (ryzyko choroby lokomocyjnej) i bezpieczeństwa konstrukcji (ryzyko rezonansu z wiatrem). Budynek lepszy ma wyższą fundamentalną częstość drgań, jest sztywniejszy, drga

¹⁶ CALCULIX, op. cit.

¹⁷ M. Salvadori, op. cit.

¹⁸ Skyscraper, op. cit.

¹⁹ P.A. Irwin, op. cit.

²⁰ Ibidem.

szybciej, wprowadzenie go w groźne drgania rezonansowe wymaga wiatru o wyższej prędkości, występującego rzadziej, mniej prawdopodobnego. Wyrażając jakość konstrukcji w [%], przyjmujemy, że konstrukcja najlepsza, o najwyższej fundamentalnej częstotliwości drgań, ma jakość 100%. Konstrukcje gorsze, o niższej częstotliwości drgań, drgające wolniej, mają jakość mniejszą od 100%. Na przykład konstrukcja o jakości 50% wykonuje dwukrotnie mniej drgań w tym samym czasie niż konstrukcja najlepsza, jej okres drgań (odwrotność częstotliwości drgań) jest dwukrotnie dłuższy.

Wyniki obliczeń konstrukcyjnej jakości kształtów wieżowców przedstawiono w tabeli 2. Na tej podstawie sporządzono ranking kształtów, szeregując kształty od najlepszego, po lewej stronie tabeli, do najgorszego, po jej prawej stronie.








Najlepszy kształt wieżowca to piramida (jakość 100%). Jest to kształt najwyższego budynku na świecie, Burj Khalifa w Dubaju²¹. Kształt taki ma też najwyższy wieżowiec w Unii Europejskiej, The Shard w Londynie²². Jest to kształt średniowiecznych wież w Bolonii²³. Jest to też kształt natury, np. pni wysokich drzew.

Cylinder zwieńczony piramidą dorównuje jakością piramidzie. Kształt takiego cylindra mają bliźniacze wieże Petronas Towers w Kuala Lumpur, w Malezji²⁴. Co istotne, obie najlepsze sylwetki wieżowców są szerokie u podstawy, zwężające się ku górze. Kolejne trzy sylwetki w hierarchii (ranking 3,4,5) mają również szeroką podstawę.

Najgorszy kształt (ranking 7, jakość 43%) to odwrócona piramida, proponowana na przykład w pracy²⁵, przeciwieństwo zwykłej piramidy. Niewiele lepszy jest kształt ogórka (ranking 6, jakość 50%), mający uzasadnienie w tradycyjnej teorii kratownic Michella, jako najbardziej sztywny (optymalny) kształt płaskiego wspornika, podpartego w dwóch punktach, zginanego statycznie siłą skupioną przyłożoną na końcu wspornika²⁶. Kratowy ogórek Michella, statycznie optymalny, nie jest kształtem najlepszym w świetle dynamicznej analizy drgań rurowych wieżowców współczesną metodą elementów skończonych. Wręcz przeciwnie, ogórek to kształt jeden z najgorszych. Kształt ogórka ma londyński wieżowiec 30 St Mary Axe²⁷.

Jakość obu najgorszych kształtów, odwróconej piramidy i ogórka, nie przekracza połowy jakości kształtów najlepszych, piramidalnych. Budynki najgorsze będą drgać dwa razy wolniej od budynków najlepszych, narażając się na niebezpieczne, narastające oscylacje rezonujące z wiatrem przy mniejszych, bardziej prawdopodobnych prędkościach wiatru. Kształty najgorsze są przeciwieństwem form najlepszych. Kształty najgorsze są nienaturalne dla zginanych wsporników - wąskie, podcięte u podstawy, poszerzające się ku górze. Kształty optymalne są naturalne, najszersze u podstawy. Nowatorskie, zaskakujące sylwetki odwróconej piramidy i ogórka nie mają w świetle wyników tej pracy zalet konstrukcyjnych. Są to formy konstrukcyjne o relatywnie małej odporności na drgania i wiatr.

Tabela 2. Hierarchia kształtów

Nazwa	piramida	cylinder zwieńczony piramidą	piramida zwieńczona cylindrem	cylinder	klepsydra	ogórek	piramida odwrócona
Kształt							
Ranking	1		3	4	5	6	7
Ocena opisowa	bardzo dobra		dobra		dostateczna	mierna	
Jakość [%]	100		87	85	66	50	43
Średnica podstawy [m]			40			20	

Źródło: opr. własne.

²¹ *Burj Khalifa*, http://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa [dostęp: 01-05-2013].

²² *The Shard*, http://en.wikipedia.org/wiki/The_Shard [dostęp: 01-05-2013].

²³ *Skyscraper*, op. cit.

²⁴ *Petronas Towers*, http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers [dostęp: 01-05-2013].

²⁵ A. Allen, W. Zalewski, op. cit., s. 488.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ *30 St Mary Axe*, op. cit.

Nie tylko cały budynek o kształcie odwróconej piramidy ma niską jakość. Mniejszy segment w postaci odwróconej piramidy, mający wysokość połowy budynku, także negatywnie wpływa na jakość wieżowca. Segmenty takie zostały wyróżnione, przekreślone poziomą linią na sylwetkach budynków w tabeli 2. Trzy budynki na końcu hierarchii kształtów - odwrócona piramida, ogórek i klepsydra - mają taki segment. Budynek najgorszy, odwrócona piramida, ma dwa takie segmenty - jeden na dole, drugi na górze. Budynek przedostatni, ogórek, ma jeden taki segment, u podstawy. Budynek trzeci od końca, klepsydra, ma jeden taki segment, położony na górze. Nowoczesny kształt klepsydry posiada warszawski wieżowiec Warsaw Spire²⁸. Jakość klepsydry wynosi 66% - jest wyraźnie wyższa od jakości odwróconej piramidy i ogórka. Klepsydra zawdzięcza to dobrej, piramidalnej podstawie, tak samo szerokiej jak podstawy budynków położonych wyżej w hierarchii. Klepsydra jest jednak od tych budynków wyraźnie gorsza z powodu odwróconej piramidy na szczycie. Segment w postaci odwróconej piramidy wszędzie szkodzi, bardziej na dole budynku (wąska, podcięta podstawa - ogórek), mniej na górze (ciężki, spowalniający drgania szczyt - klepsydra), najbardziej na dole i na górze (podcięta podstawa i ciężki szczyt - odwrócona piramida).

Badanym kształtom przypisano w tabeli 2 oceny opisowe - bardzo dobra, dobra, dostateczna, mierna - wedle następujących zasad. Oba kształty mierne są podcięte na dole, mają wąską podstawę, są nienaturalne dla zginanych wsporników, wyglądają jak drzewa osłabione przez bobry w celu ich przewrócenia. Pięć kształtów co najmniej dostatecznych ma bezpieczną, szeroką podstawę, bez podcięcia. Cztery kształty co najmniej dobre w ogóle nie zawierają segmentu odwróconej piramidy. Nie ma wśród kształtów co najmniej dobrych form zaskakujących. Dwa kształty bardzo dobre są piramidalne. Wszystkie trzy badane kształty nowatorskie - klepsydra, ogórek i odwrócona piramida - są nienaturalne i zajmują końcowe pozycje w konstrukcyjnej hierarchii form budynków wysokich, opartej na analizie fundamentalnej częstości drgań własnych, związanej z odpornością na obciążenie wiatrem.

PODSUMOWANIE

W pracy wykonano prostą analizę porównawczą wpływu kształtu budynków wysokich na jakość konstrukcji, jej odporność na dynamiczne działanie wiatru. Jako kryterium jakości przyjęto fundamentalną, minimalną częstość drgań własnych, odpowiadającą

kołysaniu się wieżowca jak zginanego wspornika. Obliczenia częstości drgań wykonano nowoczesną metodą elementów skończonych. Zbadano jakość siedmiu rurowych wieżowców o charakterystycznych sylwetkach. Obok klasycznych, naturalnych kształtów piramidy i cylindra rozpatrzono intrygujące nowe formy - odwróconej piramidy, ogórka i klepsydry. Ustalono hierarchię kształtów wieżowców. Badane kształty nowatorskie - klepsydra, ogórek i odwrócona piramida - znalazły się na końcu hierarchii, okazały się mało odporne na drgania wywołane wiatrem. Najlepszy kształt to piramida, kształt wysokich drzew. Nienaturalna, odwrócona piramida to kształt najgorszy. Budynków wysokich, podobnie do drzew, nie należy podcinać u podstawy i poszerzać w wierzchołku. Praca adresowana jest do architektów zainteresowanych koncepcyjnym projektowaniem budynków wysokich. Ułatwia ona orientację w przestrzeni możliwych sylwetek wieżowców, przypisując kształtom ocenę jakościową, porządkując je hierarchicznie i wskazując cechy geometryczne korzystne i niekorzystne dla efektywności konstrukcji.

LITERATURA

1. **Allen A., Zalewski W. (2010)**, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ.
2. **Irwin P.A. (2010)**, *Vortices and tall buildings: A recipe for resonance*, http://www.math.lsa.umich.edu/~krasny/math654_irwin.pdf [dostęp: 01-05-2013].
3. **Salvadori M. (1990)**, *Why buildings stand up*, W.W. Norton & Company, New York.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

1. *Burj Khalifa*, http://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa [dostęp: 01-05-2013].
2. *CALCULIX*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Calculix> [dostęp: 01-05-2013].
3. *Petronas Towers*, http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers [dostęp: 01-05-2013].
4. *The Shard*, http://en.wikipedia.org/wiki/The_Shard [dostęp: 01-05-2013].
5. *Skyscraper*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 01-05-2013].
6. *Warsaw Spire*, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?buildingID=89012> [dostęp: 01-05-2013].
7. *World's Tallest Buildings 2013*, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=200> [dostęp: 01-05-2013].
8. *30 St Mary Axe*, http://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe [dostęp: 01-05-2013].

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego S/WA/1/11 Politechniki Białostockiej.

²⁸ *Warsaw Spire*, op. cit.