

Pomiary drgań aeroelastycznych modeli masztów z odciągami w tunelu aerodynamicznym

Jarosław Bęc, Tomasz Lipecki, Ewa Błazik-Borowa¹

¹ Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.bec@pollub.pl, t.lipecki@pollub.pl, e.blazik@pollub.pl

Streszczenie: W niniejszym referacie przedstawiono wyniki analizy odpowiedzi dynamicznej modeli masztów z odciągami w tunelu aerodynamicznym na działanie przepływu wiatru o zróżnicowanych parametrach. Pomierzone zostały przebiegi przyspieszeń w wybranych punktach modeli oraz przebiegi sił w odciągach, które zostały następnie poddane analizie widmowej. Analizowano wpływ parametrów struktury wiatru na odpowiedź masztów z odciągami. Otrzymane wyniki porównano z danymi otrzymanymi w wyniku analizy numerycznej modelu masztu poddanego oddziaływaniu wiatru.

Słowa kluczowe: oddziaływanie wiatru, tunel aerodynamiczny, maszty z odciągami, drgania, model aeroelastyczny.

1. Wprowadzenie

Dynamiczna odpowiedź masztów z odciągami może być analizowana dwoma sposobami: za pomocą badań eksperymentalnych lub poprzez analizy numeryczne. Pomiary odpowiedzi konstrukcji można wykonywać na rzeczywistych konstrukcjach in-situ, bądź na modelach w tunelu aerodynamicznym. W poniższym referacie zaprezentowano wyniki pomiarów drgań dwóch modeli masztów z odciągami poddanych oddziaływaniu wiatru w tunelu aerodynamicznym. Badania przeprowadzono w odniesieniu do masztów o trójkątnym i kwadratowym przekroju trzonu. Pomierzone zostały przebiegi czasowe przyspieszeń w wybranych punktach trzonów oraz przebiegi czasowe sił w odciągach modeli masztów. Uwzględnione zostały trzy przypadki napływu powietrza zróżnicowanych charakterystykach, takich jak: pionowy profil średniej prędkości wiatru, pionowy profil intensywności turbulencji, funkcje gęstości widmowej mocy prędkości wiatru. Zróżnicowanie przepływów zostało uzyskane przez odpowiedni dobór elementów turbulizujących, formujących warstwę przyścienną w tunelu aerodynamicznym. Uwzględnione zostały także różne kierunki napływu wiatru względem modeli. Wyniki uzyskane w badaniach zostały porównane z rezultatami analiz numerycznych.

2. Opis badań w tunelu aerodynamicznym

Badania zastały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Zestawy elementów turbulizujących i odpowiadające im charakterystyki przepływów zostały dobrane na podstawie wcześniejszej analizy [2], której poddano 45 różnych ustawień tych elementów. Spośród nich wybrano sześć układów o najbardziej zróżnicowanych charakterystykach, z których trzy ostatecznie znalazły zastosowanie w niniejszych badaniach. Poniżej opisano przyjęte ustawienia:

- *bz2kl0* – barierka zębata o wysokości 20 cm (profil nr 1);
- *it10bz3kl0* – iglice o przekroju w kształcie litery *T* i wysokości 100 cm, barierka zębata o wysokości 30 cm (profil nr 3);
- *iv10bz4kl20* – iglice o przekroju trójkątnym i wysokości 100 cm, barierka zębata o wysokości 40 cm, klocki wysunięte na wysokość 20 cm (profil nr 6).

Pionowy profil średniej prędkości wiatru został opisany za pomocą wzoru potęgowego [1]:

$$u(z) = k \cdot z^\alpha \quad \text{dla} \quad z > z_{\min} \quad (1)$$

gdzie wartości k i α zostały obliczone metodą najmniejszych kwadratów w oparciu o pomierzone dane na wybranych wysokościach, zaś z jest wysokością ponad poziomem podłogi tunelu aerodynamicznego, mierzoną w centymetrach. Współczynniki k we wzorach opisujących profile zostały tak dopasowane, aby prędkości w poszczególnych przypadkach były jednakowe na wysokości 70 cm. Wartości prędkości otrzymywane za pomocą wzoru (1) wyrażone są w metrach na sekundę. Wyznaczone w ten sposób wartości charakterystyczne w odniesieniu do poszczególnych profili zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wybranych pionowych profile średniej prędkości wiatru.

Profil	Symbol	k	α
1	$bz2kl0$	4,26	0,20
2	$it10bz3kl0$	2,99	0,28
3	$iv10bz4okl20$	0,93	0,55

Podobną procedurę zastosowano w celu opisanego innych parametrów struktury wiatru. Szczegółowy opis przeprowadzonej analizy struktury wiatru w tunelu aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej przy różnych ustawieniach elementów formujących warstwę przyścienną przedstawiono w pracy [2].



Rys. 1. Model masztu z odciągami w tunelu aerodynamicznym i widok elementów formujących warstwę przyścienną.

Modele masztów z odciągami były umieszczane na stole obrotowym w sekcji roboczej tunelu aerodynamicznego. Badano odpowiedź dwóch modeli masztów:

- $M1$ ($m_{tr} 2x2_{circ}$) o trójkątnym przekroju poprzecznym trzonu (trzy płaszczyzny odciągów);
- $M2$ ($m_{kw} 2x2_{circ}$) o kwadratowym przekroju poprzecznym trzonu (cztery płaszczyzny odciągów).

Na rysunku 1 przedstawiono widok modelu $M1$ w tunelu aerodynamicznym.

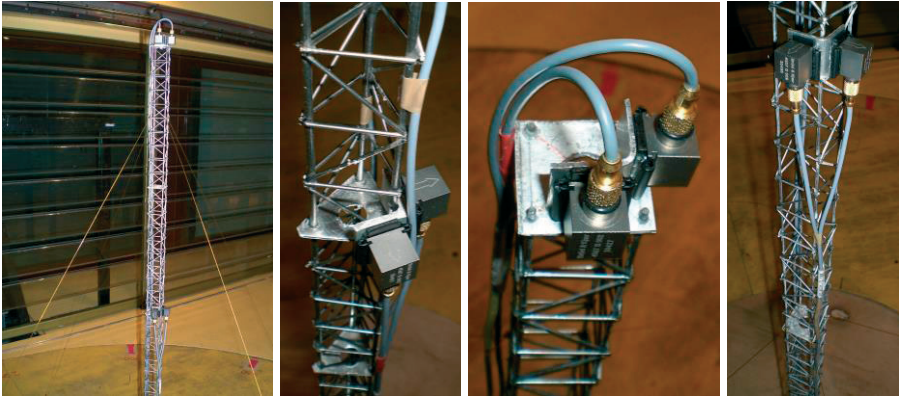
Oba modele wykonane zostały z drutu stalowego o przekroju od 1 do 2 mm. Modele masztów swobodnie podparto na dole trzonu oraz stabilizowano w pionie za pomocą dwóch poziomów odciągów wykonanych z linki stalowej o średnicy 0,25 mm. Punkty zamocowania odciągów zlokalizowano na wysokościach 40 cm i 90 cm przy kątach nachylenia odciągów odpowiednio 45° i 60°. Długość boku przekroju poprzecznego każdego z trzonów wynosiła 2 cm, zaś całkowita wysokość każdego z modeli to 1 m.

Badania wykonano przy różnych ustawieniach modeli i kątach napływu wiatru zmieniających się od 0° do 180° co 45° w przypadku masztu o kwadratowym przekroju trzonu i co 30° przy trzonie o przekroju trójkątnym. Pomiarów wykonano przy stopniowo wzrastającej średniej prędkości wiatru (16 poziomów) od 0 m/s do około 20 m/s.

2.1. Pomiarzy przyspieszeń

Pomiarzy przyspieszeń zostały wykonane w dwóch prostopadłych kierunkach w poziomej płaszczyźnie: wzdłuż osi podłużnej tunelu, zgodnie z kierunkiem wektora średniej prędkości wiatru i w kierunku poprzecznym, na dwóch wysokościach każdego z modeli: na szczycie ($h = 100$ cm) i w środku górnego przęsła ($h = 60$ cm).

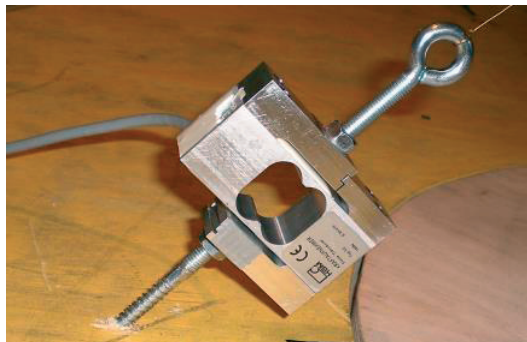
W pomiarach wykorzystano zestaw czterech akcelerometrów Brüel&Kjær 4507B-002 podłączonych do analizatora PULSE. Na rysunku 2 przedstawione zostały akcelerometry zamontowane na modelach masztów z odciągami. Zastosowano częstotliwość próbkowania 8192 Hz przy długości zapisu około 20 s w każdym z analizowanych przypadków. Przyspieszenia rejestrowano jednocześnie z pomiarem przebiegów sił w odciągach modeli masztów oraz prędkości wiatru.



Rys. 2. Akcelerometry zamontowane na modelu masztu z odciągami.

2.2. Pomiarzy sił w odciągach

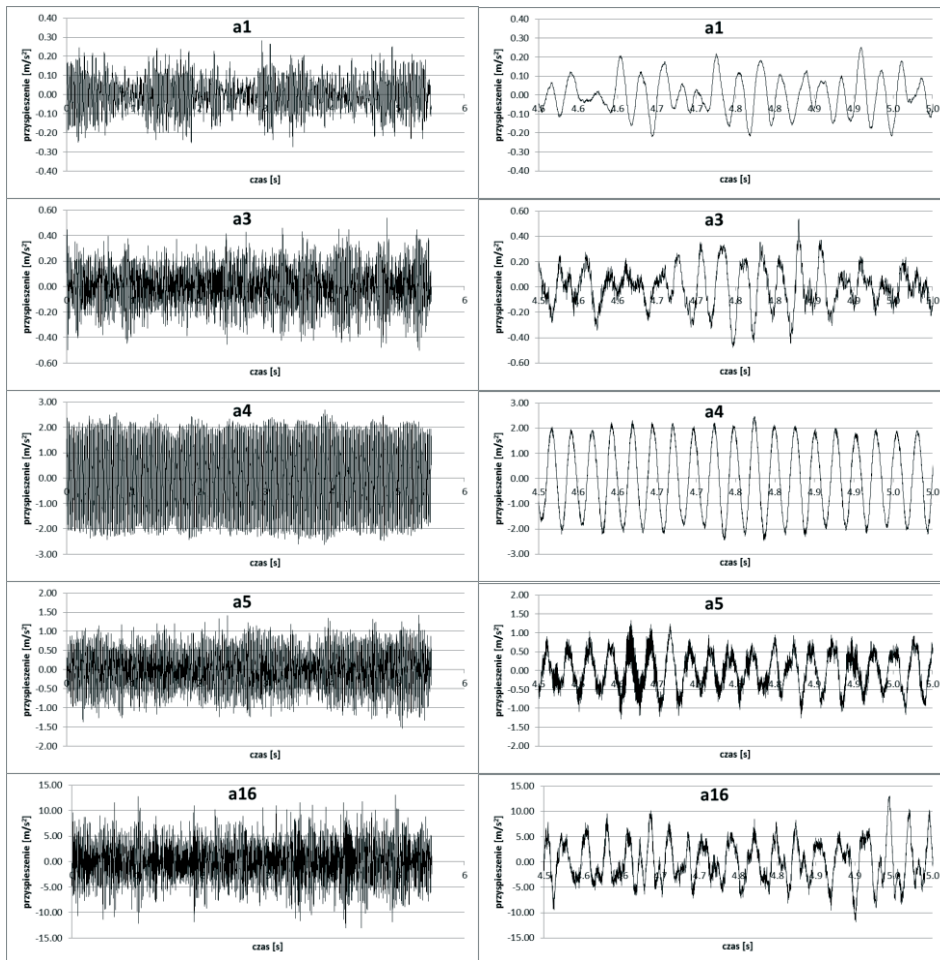
Przy pomiarach sił w odciągach modeli masztów wykorzystano czujnik siły osiowej Hottinger S2/100 z zakresem pomiarowym do 100 N. Rejestrowano przebiegi czasowe sił zarówno w odciągu górnym (*og*) jak i dolnym (*od*). Zostały wzięte pod uwagę różne ustawienia modeli względem napływającego wiatru, co umożliwiło między innymi pomiar sił w odciągach nawietrznych i zawietrznych. Pomiarzy sił w odciągach wykonywane były jednocześnie z pomiarem przyspieszeń, prędkości za pomocą termooanemometrów i pomiarem średniej prędkości wiatru w oparciu o dane ze skanera ciśnień. Jednoczesne pomiarzy pozwolą na dalszą analizę korelacji pomiędzy prędkością wiatru i przebiegami sił w odciągach. Na rysunku 3 przedstawiony został czujnik siły z zamocowanym do niego odciągiem modelu masztu.



Rys. 3. Czujnik siły w odciągu modelu masztu.

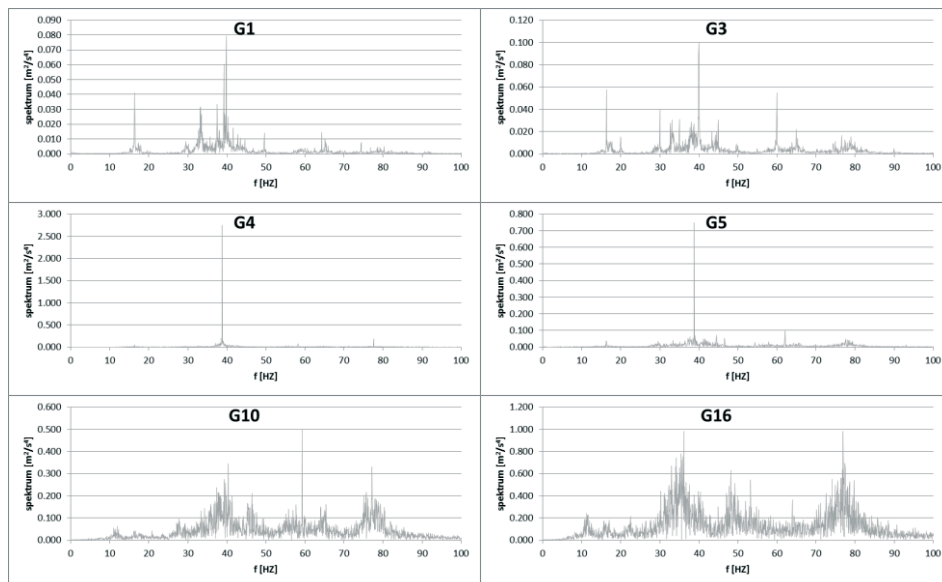
3. Wyniki

W wyniku pomiarów uzyskano przebiegi przyspieszeń w dwóch kierunkach w wybranych punktach modeli masztów. Na rysunku 4 przedstawione zostały przebiegi przyspieszeń o kierunku wzdłuż średniej prędkości wiatru na kilku wybranych poziomach spośród 16 pomierzonych w odniesieniu do jednego z modeli. Wykresy po lewej przedstawiają 5,5-sekundowy wycinek pomierzonych przebiegów, zaś po prawej stronie przedstawiono fragmenty tych przebiegów obejmujące czas 0,5 s.



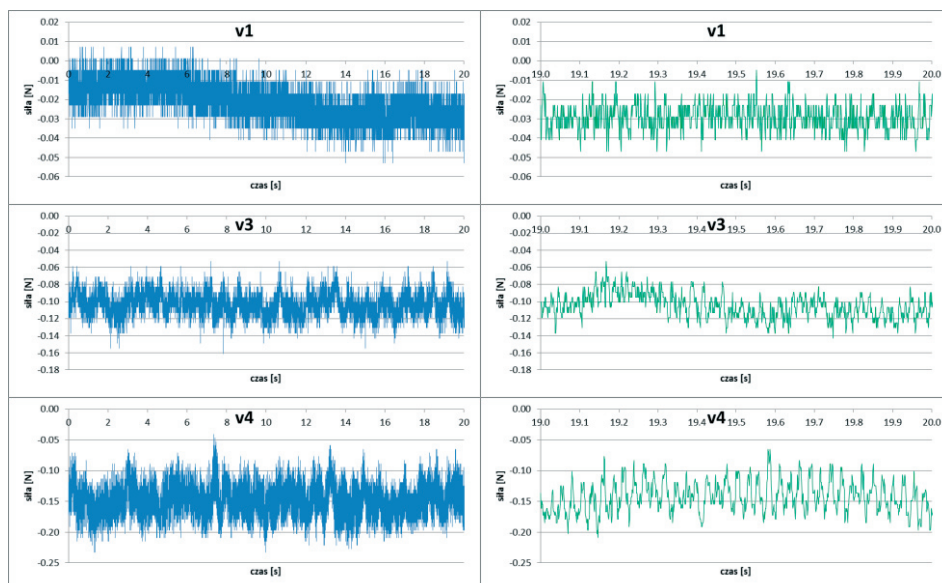
Rys. 4. Przyspieszenia o kierunku wzdłuż wektora prędkości średniej pomierzone na szczycie masztu o trójkątnym przekroju trzonu przy pierwszym zestawie elementów turbulizujących (*od_m_tr_2x2_circ-bz2kl0*).

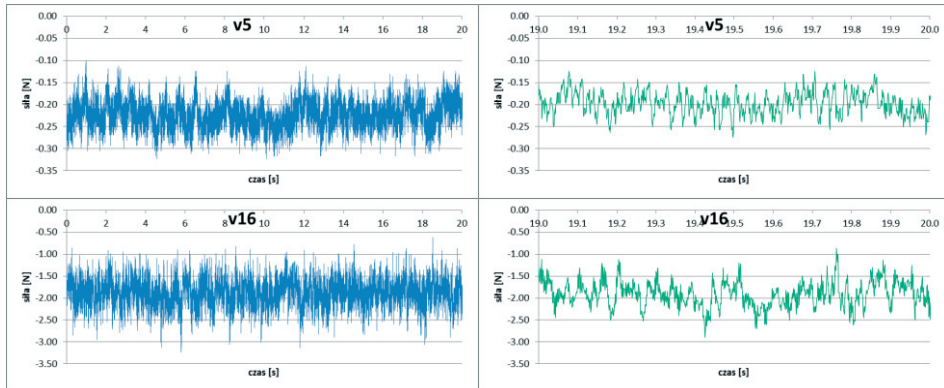
Przeprowadzono analizę widmową otrzymanych przebiegów przyspieszeń. Gęstości widmowe mocy zostały obliczone za pomocą oprogramowania HBM Catman. Przykładowe wykresy odnoszące się do przebiegów przyspieszeń zaprezentowanych powyżej zamieszczono na rysunku 5.



Rys. 5. Wykresy gęstości widmowej mocy przyspieszeń (*od_m_tr_2x2_circ-bz2kl0*).

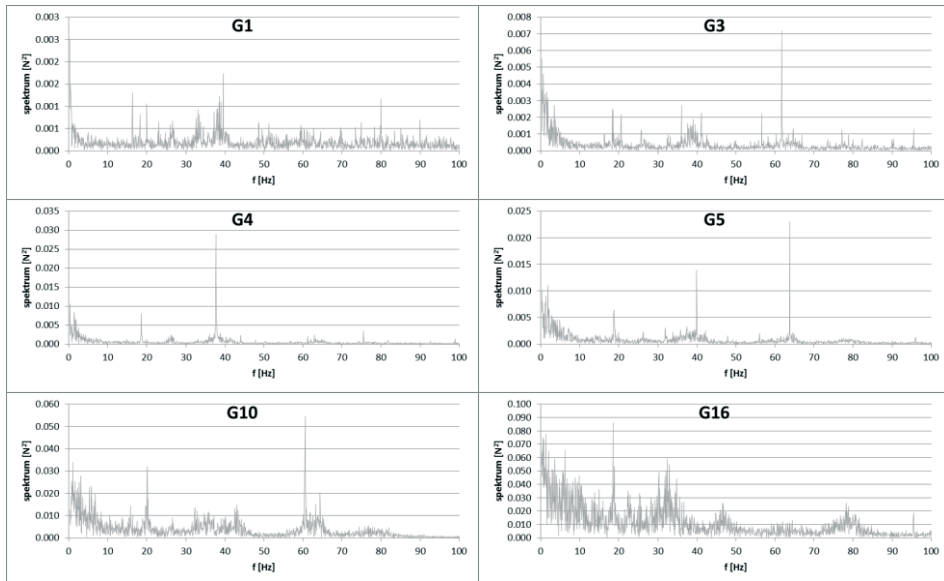
Podobne wykresy, jak w odniesieniu do przebiegów przyspieszeń, zostały pokazane na rysunku 6 w odniesieniu do przebiegów sił w odciegach modeli masztów z odciegami. Po lewej stronie przedstawione zostały całe przebiegi pomierzone w czasie 20 s, zaś po prawej pokazane zostały wycinki tych przebiegów obejmujące czas 1 s.





Rys. 6. Przebiegi sił w dolnym nawietrznym odciągu masztu o przekroju trójkątnym (*od_m_tr_2x2_circ-bz2kl0*).

W odniesieniu do przebiegów sił w odciągach wykonano także analizę widmową, zaś jej wyniki przedstawiono na wykresach na rysunku 7.

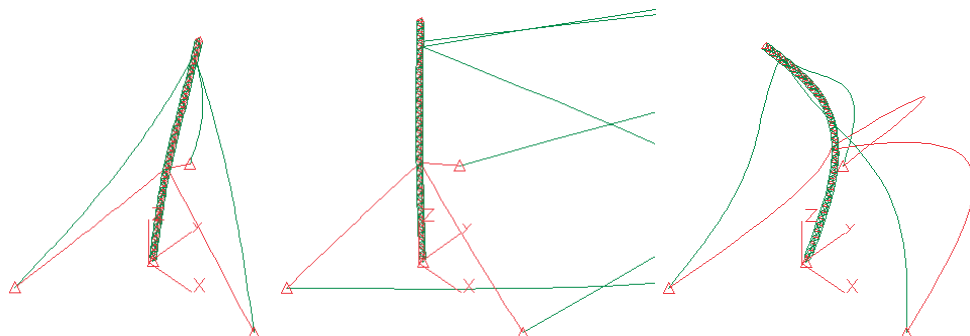


Rys. 7. Wykresy gęstości widmowych mocy sił w dolnym odciągu modelu masztu o trójkątnym przekroju trzonu (*od_m_tr_2x2_circ-bz2kl0*).

Tabela 2. Zestawienie częstotliwości drgań własnych modelu masztu z odciągami o trzonie trójkątnym.

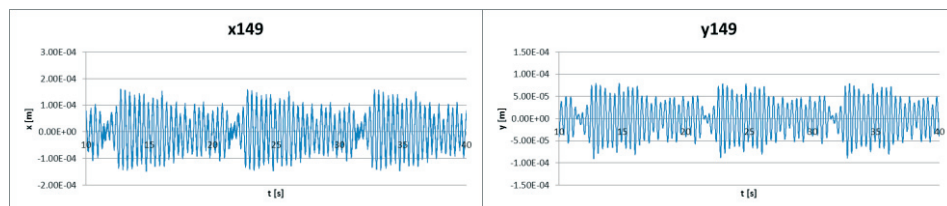
Nr	Częstotliwość [Hz]	Opis postaci
1	2,78	Skrotna trzonu
2	36,25	Giętna trzonu
3	36,25	Giętna trzonu
4-6	69,87	Drgania odciągów
7	69,91	Drgania odciągów
8-9	69,97	Drgania odciągów, nieznaczne ugięcie trzonu
10-11	96,73	Giętna trzonu

Wyniki otrzymane z badań modelowych w tunelu aerodynamicznym zostały porównane z wynikami analizy numerycznej bazującej na metodzie elementów skończonych. W pierwszym etapie obliczeń wykonana została analiza modalna. Wyznaczono częstości i postacie drgań własnych modelu masztu. Spośród przedstawionych w tabeli 2 jedenastu pierwszych częstości drgań własnych, tylko kilka związanych jest z drganiami giębnymi trzonu. Pierwsza postać drgań jest skrętna i nie jest istotna ze względu na oddziaływanie wiatru. W postaciach od 4. do 7. obserwowane są drgania odciągów, zaś w przypadku postaci 8. i 9. drgania trzonu są bardzo małe i w tych przypadkach również dominują drgania odciągów. Na rysunku 8 zostały przedstawione przykładowe postacie drgań własnych, w których widoczne są drgania trzonu modelu masztu.

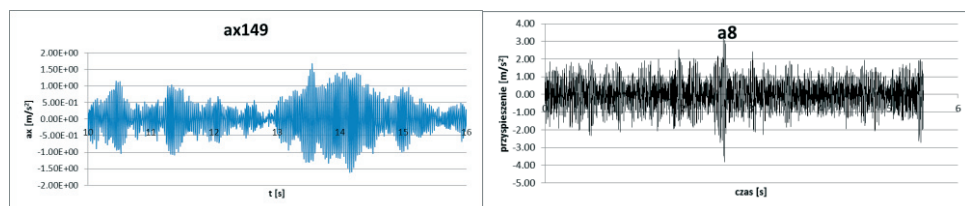


Rys. 8. Przykładowe postacie drgań własnych modelu masztu o trzonie trójkątnym: druga, ósma i dziesiąta.

Wykorzystane zostało własne oprogramowanie oparte na komercyjnym systemie ALGOR i własnych procedurach opisanych we wcześniejszych pracach [3, 4]. Oddziaływanie wiatru modelowano za pomocą wzorów z teorii quasi-ustalanej [5] przy założeniu, że przemieszczenia modelu masztu pod wpływem oddziaływania wiatru mogą być przybliżone jako kombinacja liniowa przemieszczeń w wybranych, reprezentatywnych postaciach drgań własnych. Wyznaczone zostały przebiegi przyspieszeń w węzłach modeli masztów z odciągami, zaś ich przykładowe przebiegi dla obu kierunków zostały przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowe przebiegi przemieszczeń na szczycie modelu masztu uzyskane w wyniku analizy numerycznej.



Rys. 10. Porównanie odpowiednich przebiegów przyspieszeń uzyskanych w badaniach (z lewej) i z analizy numerycznej (z prawej).

W wyniku dwukrotnego różniczkowania otrzymanych przebiegów przemieszczeń, uzyskane zostały przebiegi przyspieszeń. Porównano obliczone amplitudy przyspieszeń i ich odchylenia standardowe z wartościami uzyskanymi w odpowiadającym analizie

numerycznej przypadku badań, tj. na ósmym stopniu średniej prędkości wiatru ($v \approx 10$ m/s), zaś na rysunku 10 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników.

Wyniki uzyskane na podstawie analizy numerycznej są zgodne z rezultatami badań w tunelu aerodynamicznym. Amplitudy przyspieszeń osiągają tu wartości około $1,6$ m/s², podobnie jak podczas badań. Można zaobserwować chwilowy wzrost wartości przyspieszeń do około 3 m/s² spowodowany działaniem porywu wiatru, co jednak nie wpływa znacząco na rezultat porównania.

4. Wnioski

Następujące wnioski mogą zostać wyciągnięte na podstawie przeprowadzonej analizy:

- Amplitudy przyspieszeń doznają nagłego wzrostu do około 2 m/s² w przypadku *a4*, a następnie maleją do około 1 m/s². W kolejnych przypadkach amplitudy stopniowo wzrastają wraz ze wzrostem prędkości wiejącego wiatru.
- Można wyróżnić jedną dominującą częstotliwość na przebiegach przyspieszeń i na wykresie gęstości widmowej mocy w przypadku *a4*.
- Wyniki pomiarów pozwalają uznać średnią prędkość wiatru odpowiadającą temu przypadkowi za krytyczną.
- Na wykresach przebiegów sił w odciągach widoczne są zarówno częstości obserwowane wcześniej na wykresach przyspieszeń trzonu masztu, jak i nowe częstości, związane zatem z drganiami jedynie odciągów.

Parametry struktury wiatru mają istotny wpływ na odpowiedź masztów z odciągami. Pomiar przyspieszeń pozwala na identyfikację postaci drgań własnych masztów. Trzony masztów o różnych przekrojach w małym stopniu wpływają pole przepływu w tunelu aerodynamicznym za modelami. Spowodowane to jest zapewne specyfiką konstrukcji tego typu, tj. przede wszystkim znaczną smukłością trzonów masztów z odciągami.

Literatura

- 1 Flaga A. Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania. Arkady, Warszawa, 2008.
- 2 Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E. Research on Wind Structure in the Wind Tunnel of Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. Journal of Physics: Conference Series 318 (2011) 072003, doi: 10.1088/1742-6596/318/7/072003
- 3 Bęc J., Flaga A. Aerodynamic Analysis of Guyed Masts. Proc. 4th Symposium "Environmental Effects on Buildings and People". Cracow, Lublin, Susiec, June 16-18, 2004
- 4 Bęc J., Flaga A. Guyed Masts Subjected to Wind and Other Environmental Actions. Proc. the 4th European & African Conference on Wind Engineering, July 11-15, 2005, Prague, Czech Republic
- 5 Flaga A. Quasisteady theory in aerodynamics of slender structures. Sonderforschungsbereich 151 – Tragwerksdynamik, Berichte Nr. 25. Ruhr Universität Bochum, Germany

Wind Tunnel Measurements of Aeroelastic Guyed Mast Models

Jarosław Bęc, Tomasz Lipecki, Ewa Błazik-Borowa¹

¹ Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: j.bec@pollub.pl, t.lipecki@pollub.pl, e.blazik@pollub.pl

Abstract: The dynamic response of guyed masts models to the wind action in the wind tunnel was analyzed in the paper. Accelerations and forces in guys were measured. Spectra of the response were calculated. The influence of the wind structure on the response was analyzed. The results obtained from experiments were compared to the ones coming from a numerical analysis.

Keywords: guyed masts, wind action, wind tunnel, boundary layer, dynamic response.