

## SYMULACJA NUMERYCZNA DRGAŃ MASZTU TELEKOMUNIKACYJNEGO

JANUSZ KOWAL, JACEK SNAMINA, PAWEŁ ORKISZ

*Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
e-mail: jkowal@agh.edu.pl, snamina@agh.edu.pl, orkisz@agh.edu.pl*

Streszczenie. W pracy przedstawiono model i analizę drgań masztu telekomunikacyjnego. Do obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Wyznaczono częstości i formy drgań własnych konstrukcji. Drgania wywołane wiatrem oraz drgania wywołane zjawiskami sejsmicznymi oszacowano, posługując się analizą gęstości widmowej mocy (PSD). Przeprowadzone obliczenia stanowiły punkt wyjścia do budowy stanowiska laboratoryjnego, na którym będą badane układy redukcji drgań konstrukcji smukłych.

### 1. WSTĘP

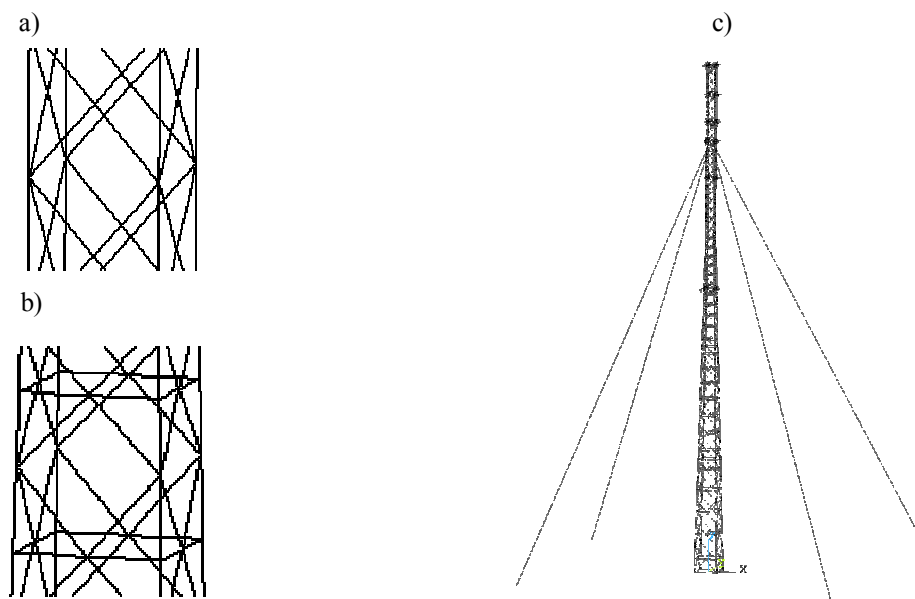
Konstrukcje masztów powinny wykazywać dużą odporność na oddziaływanie czynników zewnętrznych takich jak wiatr czy ruchy sejsmiczne podłoża [1]. Dlatego coraz częściej w fazie projektowania konstrukcji uwzględnia się możliwość zastosowania aktywnych lub semiaktywnych układów redukcji drgań. Układy te pozwalają wydłużyć czas bezawaryjnej eksploatacji konstrukcji masztów oraz urządzeń na nich umieszczonych. Zagadnienia związane z redukcją drgań są obecnie przedmiotem prac wielu inżynierów i naukowców.

W ostatnich latach można zaobserwować szerokie zainteresowanie numerycznymi symulacjami ruchu konstrukcji. Spowodowane jest to wysoką ceną aparatury pomiarowej oraz kosztami wykonania prototypów lub modeli projektowanych konstrukcji. Dużą zaletą symulacji jest możliwość przyspieszenia prac konstrukcyjnych poprzez wprowadzanie rozwiązań optymalnych na podstawie obliczeń numerycznych. Poprawne wyniki symulacji numerycznych związane są głównie z możliwie wiernym odwzorowaniem rzeczywistego obiektu. Ze względu na różnorodność zjawisk wpływających na obiekt rzeczywisty oraz złożoność obiektu obliczenia wykonuje się, stosując specjalnie opracowany model, w którym wprowadza się szereg uproszczeń. Strukturę modelu oraz jego parametry wyznacza się, spełniając zasady analizy wymiarowej.

W artykule przedstawiono symulację drgań masztu telekomunikacyjnego. Do budowy modelu wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Wyznaczono częstości i formy drgań własnych konstrukcji. Drgania masztu wywołane oddziaływaniem wiatru i ruchem podłoża oszacowano, wykorzystując analizę gęstości widmowej mocy (PSD). Model i analizy dynamiczne wykonano, stosując pakiet Ansys Multiphysics.

## 2. MODEL MASZTU TELEKOMUNIKACYJNEGO

Typowy maszt telekomunikacyjny jest stalową konstrukcją kratową z linowymi odciągami. W górnej części masztu zamocowane są urządzenia infrastruktury naziemnej, takie jak anteny radiowo-telewizyjne, anteny telefonii komórkowej oraz nadajniki sieci bezprzewodowych. Rozpatrywany w dalszej części artykułu maszt jest konstrukcją spawaną złożoną z dwóch sekcji. Sekcja pierwsza, pełniąca rolę podstawy, składa się z dwudziestu trzech zewężających się ku górze segmentów (rys.1b). Podstawa dolnego segmentu jest kwadratem o boku  $2.04\text{ m}$ . Dwa pierwsze segmenty wzmocniono przez przyspawanie dodatkowych prętów do podstawowej konstrukcji. Sekcja druga, rozpoczynająca się na wysokości  $30\text{ m}$ , jest złożona z osiemnastu segmentów, których podstawą jest kwadrat o boku  $0,726\text{ m}$  (rys.1a). Sekcja kończy się platformą o masie  $300\text{ kg}$  umieszczoną na szczycie wieży, na wysokości  $45.7\text{ m}$ . Maszt wyposażono w cztery odciały linowe rozmieszczone symetrycznie, zamocowane w połowie górnej sekcji. W górnej części masztu na różnej wysokości rozmieszczono siedemnaście anten telefonii komórkowej. Wśród anten przeważają anteny sektorowe o masie około  $30\text{ kg}$ . W środkowej części wieży zamocowano również trzy anteny paraboliczne.



Rys.1. Model MES masztu telekomunikacyjnego

Do obliczeń numerycznych wykorzystano pakiet Ansys Multiphysics. Korzystając z dostępnej dokumentacji masztu, zdefiniowano punkty bazowe oraz linie reprezentujące kształtowniki wchodzące w skład kratownicy. Do modelowania ozebrowania wybrano belkowy element trójwymiarowy BEAM4. Wprowadzono prosty model anten, wykorzystując element MASS21 [2]. Do modelowania odciągów zastosowano elementy LINK8, uwzględniając naciąg lin. Model uzupełniono, wprowadzając odpowiednie warunki zamocowania konstrukcji. Widok modelu MES badanego masztu telekomunikacyjnego przedstawiono na rys.1c.

### 3. ANALIZA DRGAŃ MASZTU

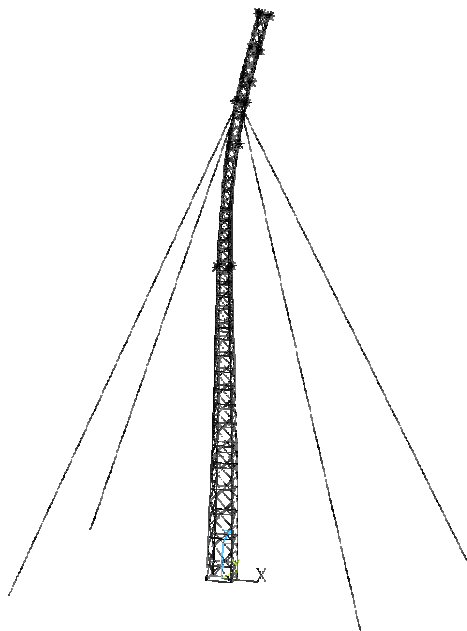
#### 3.1. Analiza modalna

Analizę modalną wykonano, stosując metodę Lanczosa. Wyznaczono podstawowe formy drgań oraz odpowiadające im częstotliwości. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1 oraz na rys.2 i 3.

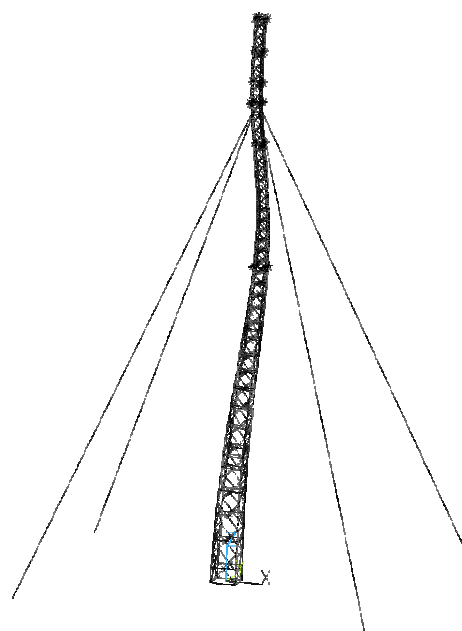
Tabela 1. Częstotliwości drgań własnych masztu

Nr formy	Częstotliwość drgań własnych [Hz]
1	2.19
2	3.15
3	7.03

Analizując otrzymane wyniki obliczeń, określono dla każdej formy punkty, w których elementy masztu są szczególnie narażone na zmęczenie materiału. Zakładając że ruch konstrukcji jest związany przede wszystkim z dwoma pierwszymi formami drgań, wyznaczono dwa przekroje wieży, w których powinny zostać umieszczone układy redukcji drgań. Pierwszą platformę z układem redukcji drgań przewidziano na szczycie masztu, drugą w przekroju łączącym opisane wcześniej sekcje wieży. W bezpośrednim otoczeniu tego przekroju występują maksymalne przemieszczenia dla drugiej formy drgań konstrukcji.



Rys.2. Pierwsza forma drgań własnych masztu



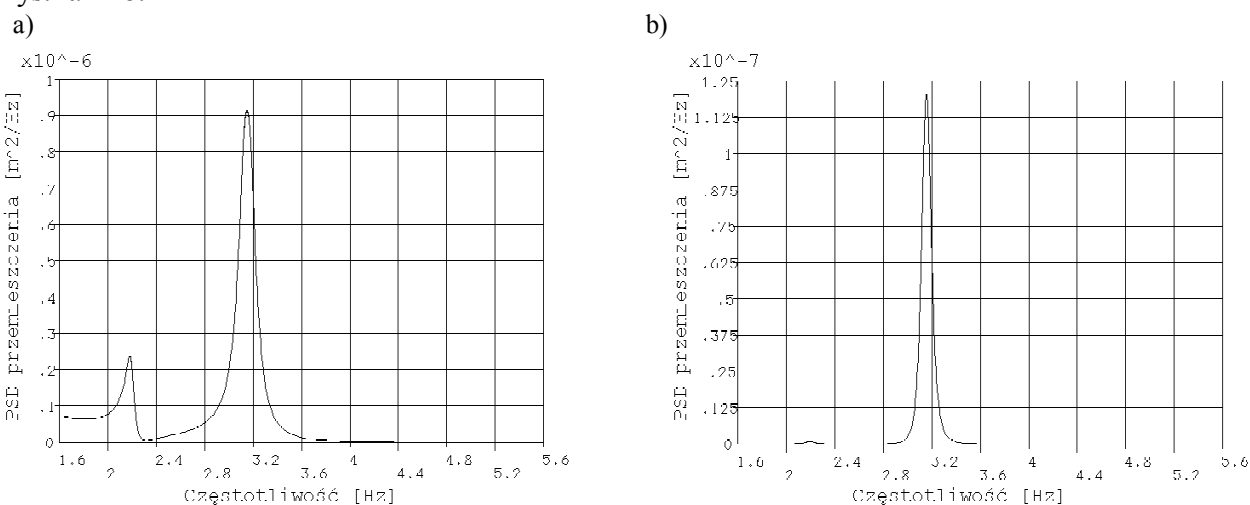
Rys.3. Druga forma drgań własnych masztu

Przeprowadzona analiza pozwoliła na podział wieży na trzy podstawowe części:

- pierwsza część to opisana dolna sekcja wieży,
- druga część obejmuje dolny fragment sekcji drugiej do wysokości zamocowań odciągów,
- trzecią część stanowi górny fragment sekcji drugiej powyżej zamocowania odciągów.

### 3.2. Analiza drgań masztu wywołanych ruchem podłoża

Drgania konstrukcji związane ze zjawiskami sejsmicznymi oszacowano, wykorzystując analizę PSD dostępną w pakiecie Ansys Multiphysics. Wymuszenie określono, uwzględniając dostępne w literaturze [3] informacje na temat trzęsień ziemi występujących na terenach Polski w okresie ostatnich 100 lat. W zdecydowanej większości przypadków projektowane konstrukcje mogą być narażone na trzęsienia nieprzekraczające pięciu stopni w skali Richtera. Uwzględniając średnie przyspieszenie fali trzęsienia ziemi równe  $0.04 m/s^2$  [4] oraz zakres częstotliwości  $0.2 - 5 Hz$ , przyjęto, w pierwszym przybliżeniu, stałą wartość gęstości widmowej mocy przyspieszenia równą  $0.00032 m^2 s^{-4} Hz^{-1}$  w rozważanym przedziale częstotliwości. Założono taki sam ruch podłoża we wszystkich punktach zamocowania wieży i odciągów oraz przyjęto, że odbywa się on wzdłuż osi x. Dla konstrukcji spawanych na ogół przyjmuje się bezwymiarowe modalne współczynniki tłumienia równe 0.02. Wyznaczono gęstości widmowe mocy przemieszczeń wybranych punktów masztu. Przykładowe wyniki obliczeń gęstości widmowej mocy dla przemieszczenia górnej platformy przedstawiono na rys.4a i 4b.



Rys.4. Wykres PSD przemieszczenia a) w kierunku osi x, b) w kierunku osi y dla górnej platformy

Korzystając z własności gęstości widmowej mocy, obliczono odchylenia standardowe przemieszczenia  $\sigma_x = 8.3 mm$  i  $\sigma_y = 1.2 mm$ . Odchylenie standardowe jest podstawą do probabilistycznej oceny przemieszczenia wybranego punktu konstrukcji. Analizując wyniki obliczeń, stwierdzamy, że ruch górnej platformy jest bardziej związany z drugą formą drgań konstrukcji niż z pierwszą formą.

### 3.3. Analiza drgań masztu wywołanych wiatrem

Najczęściej spotykany w literaturze opis prędkości wiatru zakłada, że prędkość ma składową stałą i składową zmienną. Przyjmuje się, że składowa zmienna jest procesem stochastycznym, którego gęstość widmowa, zgodnie z modelem Davenporta [5], jest opisana zależnością:

$$S_v(f) = 4v_s^2 f^{-1} \frac{\psi^2}{(1+\psi^2)^{4/3}} \quad (1)$$

gdzie  $f$  jest częstotliwością, a  $\psi$  bezwymiarową zmienną opisaną zależnością  $\psi = 1.2f/v_m$ . Składową stałą prędkości wiatru na wysokości  $z_{10} = 10\text{ m}$  oznaczono przez  $v_m$  i przyjęto jej wartość  $v_m = 15\text{ m/s}$ . Parametr  $v_s$ , mający wymiar prędkości, wyznaczono z zależności  $v_s = \sqrt{k} \cdot v_m$ , gdzie  $k$  jest bezwymiarowym współczynnikiem zależnym od wysokości oraz parametru  $z_0$  związanego z powierzchnią terenu. Współczynnik  $k$  oblicza się ze wzoru:

$$k = \frac{1}{\left(2.5 \ln \frac{z_{10}}{z_0}\right)^2} \quad (2)$$

Wartość występującego we wzorze parametru  $z_0$  przyjęto na podstawie [6], dla terenu otaczającego wieżę,  $z_0 = 0.05\text{ m}$ . Wykres gęstości widmowej mocy składowej zmiennej prędkości przy założonych wartościach składowej stałej prędkości i wysokości nad powierzchnią gruntu przedstawiono na rys.5.

Składowa stała prędkości wiatru powoduje powstanie składowej stałej parcia wiatru  $F_m$  związanego z ciśnieniem  $p_m$  strumienia opływającego konstrukcję powietrza. Wartość tego ciśnienia można obliczyć ze wzoru:

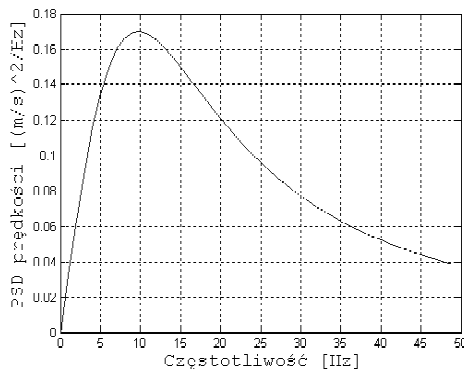
$$p_m = c_x \rho_p \frac{v_m^2}{2} \quad (3)$$

gdzie współczynnik oporu  $c_x = 2.6$ , gęstość powietrza  $\rho_p = 1.29\text{ kg/m}^3$ .

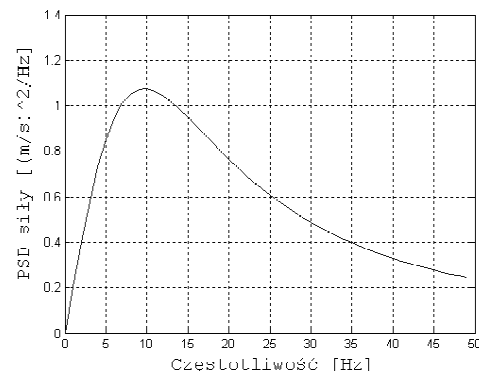
Składowa zmienna siły jest procesem stochastycznym, którego gęstość widmowa jest związana z gęstością widmową składowej zmiennej prędkości wiatru [6] następującą zależnością:

$$S_f(f) = (2F_m/v_m)^2 S_v(f) \quad (4)$$

Wykres PSD siły działającej na pojedynczy pręt kratownicy na wysokości  $10\text{ m}$  został przedstawiony na rys.6.



Rys.5. PSD prędkości na wysokości  $10\text{ m}$  nad poziomym gruntem

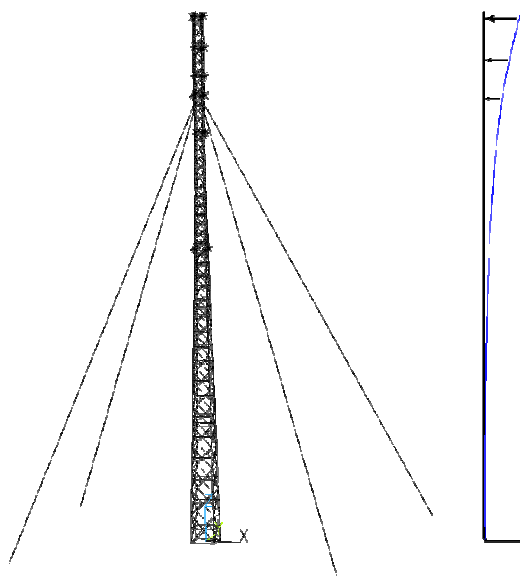


Rys.6. PSD siły na wysokości  $10\text{ m}$  nad poziomym gruntem

W związku ze znaczną wysokością masztu uwzględniono zależność prędkości wiatru od wysokości nad powierzchnią gruntu. Najczęściej przyjmuje się „pionowy profil” rozkładu prędkości wiatru [7] opisany równaniem:

$$v_z(z) = \frac{v_m}{\ln \frac{z_{10}}{k_p}} \ln \frac{z}{k_p} \quad (5)$$

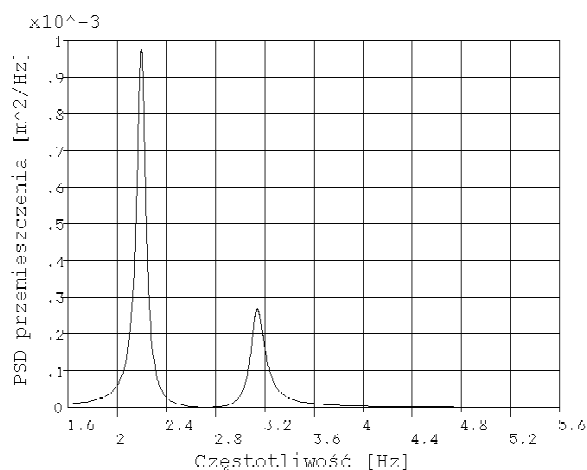
Wartość parametru szorstkości powierzchni  $k_p = 0.4 \text{ m}$  przyjęto, wykorzystując dane zawarte w [8]. W obliczeniach przyjęto, że kąty pomiędzy wektorem prędkości wiatru a przyjętymi osiami X, Y są sobie równe. Dokonano obciążenia elementów wchodzących w skład modelowanego masztu. „Pionowy profil” gęstości widmowej obciążenia masztu przedstawiono na rys.7.



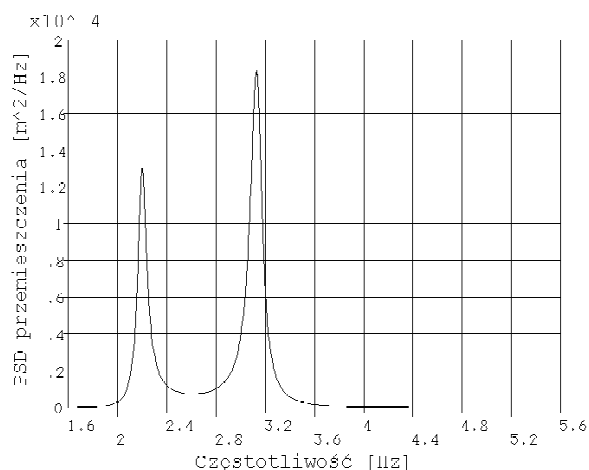
Rys.7. Pionowy rozkład obciążenia konstrukcji wiatrem

Jako wynik obliczeń otrzymano gęstości widmowe mocy przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji. Przedstawione na rys.8 gęstości widmowe przemieszczenia górnej platformy pozwoliły oszacować odchylenia standardowe przemieszczeń  $\sigma_x = 14 \text{ mm}$  i  $\sigma_y = 7 \text{ mm}$ . Ruch górnej platformy spowodowany wiatrem jest przede wszystkim związany z pierwszą formą drgań masztu.

a)



b)



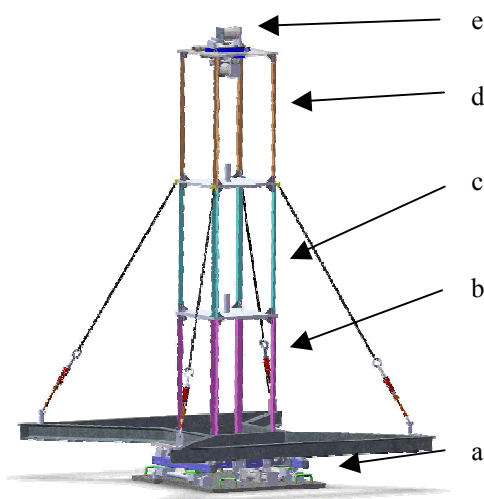
Rys.8. Wykres PSD przemieszczenia a) w kierunku osi x, b) w kierunku osi y dla górnej platformy

#### 4. PODSUMOWANIE

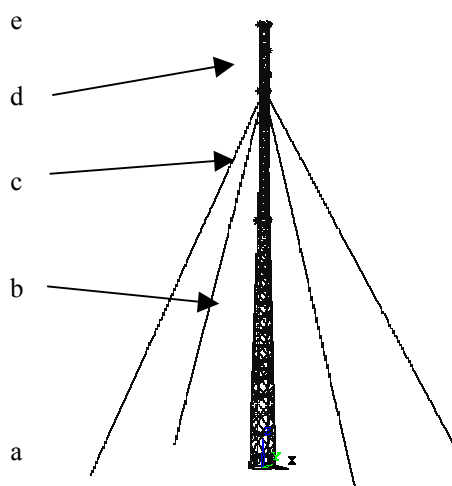
Przeprowadzone obliczenia drgań masztu telekomunikacyjnego są podstawą do oceny wpływu oddziaływania wybranych czynników zewnętrznych. Konstrukcja masztu, ze względu na rozkład częstości własnych, jest podatna na wymuszenia zewnętrzne. Przedstawiona analiza PSD wykazała znaczący wpływ oddziaływania wiatru na konstrukcję. Wpływ oddziaływania wiatru na drgania masztu był znaczny, nawet przy założonej w obliczeniach składowej stałej prędkości równej  $60 \text{ km/h}$ . Mimo niewielkiej ilości trzęsień ziemi rejestrowanych w skali rocznej na terenie Polski, wyniki obliczeń pokazują, że w przy projektowaniu masztów należy uwzględnić możliwość ruchu podłoża, wynikającego ze zjawisk sejsmicznych oraz parasejsmicznych.

Bardzo istotnym zagadnieniem z zakresu projektowania i eksploatacji masztów jest konieczność zapewnienia stateczności położenia pionowego całego masztu oraz poszczególnych ściskanych prętów będących elementami konstrukcji masztu. Utrata stateczności występuje wówczas, gdy stosunkowo dużej sile ciężkości, która po wychyleniu masztu z położenia pionowego powoduje dalsze jego odchylenie się, nie przeciwstawia się dostatecznie duża siła sprężystości. W przypadku krytycznym siły sprężystości nie są w stanie zapewnić siły zwrotnej i pionowe położenie nie jest stateczne. Uogólnione siły zwrotne związane z poszczególnymi formami drgań są, w przybliżeniu liniowym, proporcjonalne do wychylenia masztu, a współczynniki proporcjonalności można przedstawić jako różnice współczynników wynikających ze sprężystości konstrukcji oraz współczynników wynikających z oddziaływania sił ciężkości.

Wyniki analiz przedstawionych w pracy zostały wykorzystane przy projektowaniu stanowiska laboratoryjnego (rys.9).



Rys.9. Model laboratoryjny masztu



Rys.10. Model MES masztu z podziałem na części

Wyodrębniono trzy części masztu, które odwzorowano w modelu laboratoryjnym. Poszczególne części oznaczono literami b, c, d na rys.9 i 10. Do wymuszenia wykorzystano

dwuosioowy wzbudnik drgań oznaczony literą a na rys.9. Układ do redukcji drgań umieszczono na górnej platformie. Został on zrealizowany przy użyciu silników liniowych. Stanowisko do badań zostało wykonane w Katedrze Automatyzacji Procesów Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie.

*Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 4-T07A-005-30.*

## LITERATURA

1. Kowal J.: Sterowanie drganiami. Kraków : Gutenberg, 1996.
2. Łaczek S. :Wprowadzenie do systemów elementów skończonych ANSYS. Kraków 1999.
3. Zwoliński. Z: Trzęsienia ziemi w Polsce. Poznań : Instytut Paleogeografii i Geoekologii UAM, 1997.
4. Prototype International Data Centre (<http://www.pidc.org>)
5. Levy. R. :Wind power predictions model. California 1976.
6. Gawroński W., Bieńkiewicz B., Hill R. E.:Pointing-error simulations of the DSS-13 Antenna Due to wind disturbances. TDA progress report 42-108 1992
7. Sockel H.: Wind-excited vibrations of structures. Vienna: Springer-Verlag, 1994.
8. Businger J.A., Wyngaard J.C., Bradley E.F.: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer. "J.Alinos Sei." 1971, 28, p. 181-189.

## NUMERICAL SIMULATION OF ANTENNA MAST VIBRATIONS

Summary. In the paper, a finite element model of telecommunications mast is presented. Basic analyses, available in ANSYS, were used in calculations. Natural frequencies and mode shapes of the structure were determined. The assessment of mast response due wind and seismic excitations was done using power spectral density analysis. Results of calculations are helpful to build a scale model of the mast.