BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-B/2010
ZESZYT 11
ROK 107
ISSUE 11
YEAR 107

KRZYSZTOF KOZIOŁ, KRZYSZTOF STYPUŁA*

ODPOWIEDŹ MASZTU Z ODCIĄGAMI NA WSTRZĄS GÓRNICZY

RESPONSE OF GUYED MAST TO A MINING TREMOR

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie odpowiedzi konstrukcji masztu z odciągami na wymuszenie kinematyczne wstrząsem górniczym. Wykonano obliczenia dynamiczne konstrukcji masztu o wysokości 330 m z pięcioma poziomami odciągów (na wysokościach 60, 120, 180, 240 i 300 m), poddanej działaniu wstrząsu górniczego zarejestrowanego w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM). Porównano wyniki uzyskane w przypadku dwu wymuszeń: stałego – tj. o jednakowej amplitudzie drgań gruntu w każdym punkcie podparcia masztu (podpora trzonu i miejsca zakotwień odciągów w gruncie) lub zmiennego, tj. – o zmiennej amplitudzie (efekt fali wędrującej). Zamieszczone wyniki obliczeń świadczą o celowości rozpatrywania obu tych wymuszeń podczas projektowania konstrukcji tego typu.

Słowa kluczowe: *maszt z odciągami, dynamika masztu z odciągami, wstrząsy górnicze*

Abstract

The problem of response of a guyed mast to kinematic excitation by a mining tremor is presented in the paper. Dynamic calculations of 330 m high mast with 5 levels of guys (at 60, 120, 180, 240 i 300 m above ground level) due to mining tremor, which was registered in the Legnica-Głogów Copperfield (LGOM). Results obtained for two excitations: constant (constant value of ground vibration amplitude in each point of mast supporting i.e. mast and guys foundation) or changeable (changeable amplitude – effect of traveling waves) are compared. Results of calculations show that analysis both this two excitations are purposeful in design of guyed masts subjected to mining tremors.

Keywords: *guyed mast, dynamics of guyed mast, mining tremors*

* Dr inż. Krzysztof Kozioł, dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, prof. PK, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

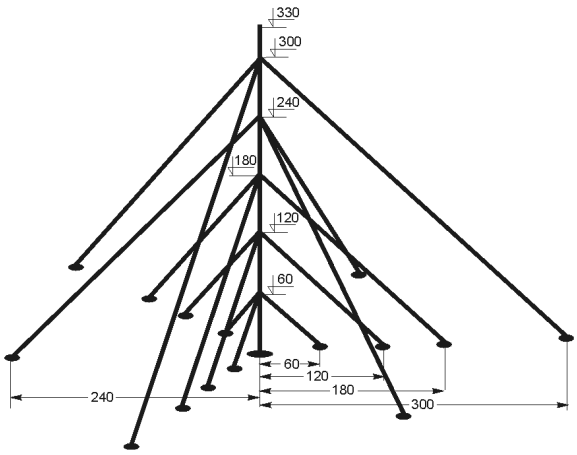
Odpowiedź konstrukcji masztów z odciągami czy wież z odciągami na obciążenia dynamiczne stanowi przedmiot zainteresowania wielu badaczy [1, 3–9]. Konstrukcje tego typu mogą być zlokalizowane na terenach sejsmicznych lub w miejscach narażonych na wpływy parasejsmiczne, gdzie pojawia się dodatkowe obciążenie kinematyczne konstrukcji wywołane ruchem podłoża. Pociąga to za sobą potrzebę wyznaczenia dodatkowych sił wewnętrznych spowodowanych przemieszczaniem się podpór masztu, zarówno podpory głównej pod trzonem, jak i podpór odciągowych. Ze względu na rozległość konstrukcji w planie (rozstaw podpór może wynosić nawet kilkaset metrów) mamy do czynienia ze zróżnicowaniem wielkości obciążenia w różnych punkach styku obiektu z podłożem [2]. Jednym z wymuszeń o charakterze parasejsmicznym są wstrząsy górnicze.

Poniżej przedstawiono obliczenia dynamiczne masztu o parametrach zbliżonych do masztu w Solcu Kujawskim o wysokości 330 m. Obliczenia wykonano, przyjmując jako wymuszenie kinematyczne zarejestrowany wstrząs górniczy z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM).

2. Model masztu

Geometrię konstrukcji rozważanego masztu przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Liny odciągowe (po trzy na każdym z pięciu poziomów) są nachylone do płaszczyzny poziomej pod kątem 45° (o ten sam kąt są odchylone od pionu), zaś kąt między ich rzutami na tę płaszczyznę wynosi 120°. Czwarta kondygnacja odciągów została obrócona w poziomie w stosunku do pozostałych o kąt 60°. Trzon masztu ma stały przekrój poprzeczny na całej wysokości, zbudowany na bazie trójkąta równobocznego o boku 2 m, w narożach którego umiejscowiono pręty pełne o przekroju kołowym f = 120 mm. Boki składają się z kratownic typu „W” o wysokości 3 m, wykonanych z kątowników L100 × × 100 × 8. Trzon zamodelowano jako element prętowy o charakterystykach odpowiadających konstrukcji rzeczywistej.



Rys. 1. Schemat analizowanego masztu (model fizyczny)
Fig. 1. Chart of analyzed mast (physical model)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Konstrukcja trzonu jest podparta na pięciu poziomach odciągami o następujących charakterystykach:

– poziom I +60 m – liny ϕ36 naciąg 145 kN,
– poziom II +120 m – liny ϕ36 naciąg 150 kN,
– poziom III +180 m – liny ϕ36 naciąg 155 kN,
– poziom IV +240 m – liny ϕ48 naciąg 207 kN,
– poziom V +300 m – liny ϕ48 naciąg 290 kN.

3. Model wymuszenia

Z reguły zakres informacji dotyczących zachowania się gruntu pod wpływem wstrząsu górniczego jest ograniczony. Wyniki pomiarów dotyczą przeważnie jednego punktu i to niejednokrotnie zlokalizowanego w pewnej odległości od obiektu, który może takim drganiom podlegać. W celu opisania zachowania się podłoża pod wpływem wymuszeń sejsmicznych bądź parasejsmicznych należałoby oprócz rejestracji w jakimś punkcie posiadać informacje związane z tłumieniem ośrodka, w jakim drgania się rozprzestrzeniają (tłumienie powinno dotyczyć każdej ze składowych częstotliwości drgań), informacje o całym spektrum drgań (w przypadku sygnału zarejestrowanego w jednym miejscu może się zdarzyć, że pominięto jakąś składową sygnału, np. punkt pomiarowy zlokalizowany jest w węźle drgań jakiejś częstotliwości), informacje o prędkości rozchodzenia się drgań w danym ośrodku czy też o ewentualności odbicia od ośrodków sąsiednich. Jak widać jest to problem bardzo złożony. Do jego opisu najczęściej wykorzystuje się podejście statystyczne, tworząc różnorodne modele propagacji drgań. Na modele te narzuca się ograniczenia i parametry związane z ukształtowaniem terenu, budową ośrodka gruntowego, typem fali (sejsmiczna czy parasejsmiczna), odległością od epicentrum, głębokością położenia źródła drgań czy wartością energii, która wywołuje te drgania, etc.

Przykładowo na obszarze LGOM w Polsce na podstawie badań empirycznych wstrząsów z lat 2000–2002 wyprowadzono wzór [10]

$$\log(\mathrm{agr}) = 2{,}54 + 0{,}225 \cdot \log(E) - 0{,}614 \cdot \log(r) \tag{1}$$

gdzie:

agr – maksymalne wypadkowe przyspieszenia drgań gruntu z trzech składowych w mm/s^2,
E – energia sejsmiczna wstrząsu,
r – odległość epicentralna.

Zależność ta odnosi się do wstrząsów niskoczęstotliwościowych (do 10 Hz).

W przypadku źródeł drgań o charakterze harmonicznym lub do niego zbliżonym uwzględnienie tzw. tłumienia geometrycznego w ośrodku idealnie sprężystym oraz absorpcji drgań w gruncie prowadzi do następującego wzoru:

$$A_r = A_0 \cdot [(r_0/r)\text{^}n] \cdot \exp[-\alpha(r - r_0)] \tag{2}$$

gdzie:

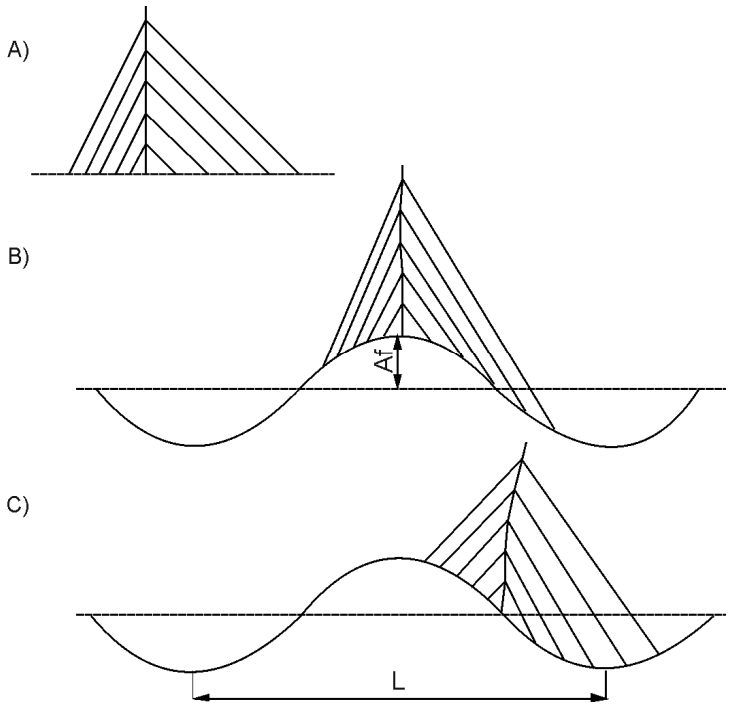
A_0 i A_r – odpowiednio amplitudy (przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń) w odległościach r_0 i r od źródła drgań,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

n – współczynnik rozbieżności przyjmowany w zależności od rodzaju fali: fale powierzchniowe Rayleigha $n = 0,5$, fale przestrzenne (podłużne i poprzeczne) $n = 1,0$,

α – współczynnik absorpcji drgań; przyjmowany jest w zależności od rodzaju gruntu i mieści się w granicach $0,01 \cdot 1/m – 0,10 \cdot 1/m$.

Biorąc pod uwagę prędkości rozchodzenia się fal wstrząsowych w gruncie, przyjęto, że analizowana konstrukcja będzie się znajdować na grzbiecie jednej fali gruntu oraz alternatywnie grunt będzie przemieszczał się translacyjnie w sposób stały zgodnie z wymuszeniem. Na rys. 2 przedstawiono uwzględnione w analizie schematy zachowania się konstrukcji pod wpływem odkształceń gruntu pod nią w odniesieniu do składowej pionowej drgań. Podobnie rozważano wpływ składowych poziomych. Pod wpływem zmiany kształtu powierzchni gruntu zmieniają się położenia zarówno podpory głównej trzonu, jak i podpór odciągów. Proces deformacji powierzchni gruntu jest zmienny w czasie, wobec czego ulegają również zmianie wzajemne różnice położenia podparć (w poziomie i w pionie). Podpora trzonu może się znajdować na grzbiecie fali, jak również poza nim. Z punktu widzenia projektowania należy znaleźć najniekorzystniejszy wariant usytuowania obiektu na umownej powierzchni odkształconego gruntu.

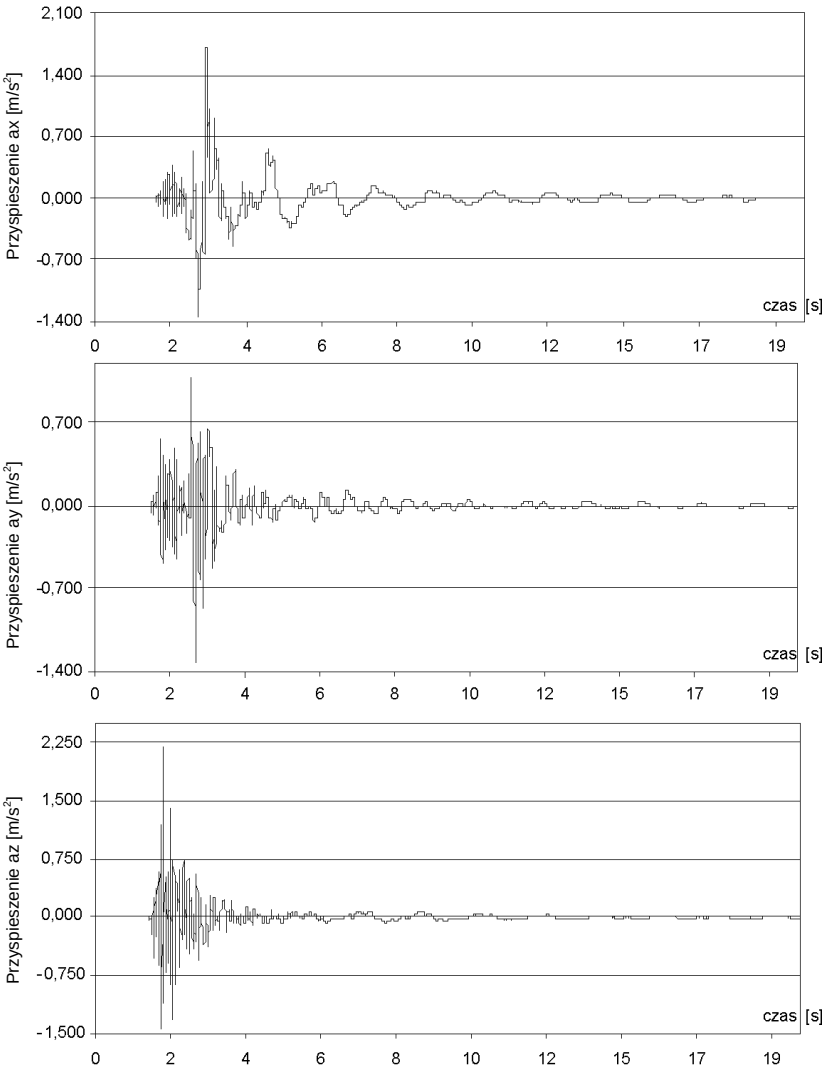


Rys. 2. Analizowane warianty wymuszenia konstrukcji w przypadku pionowej składowej fali wstrząsowej
Fig. 2. Variants of excitation for vertical component of tremor wave

W celu rozważenia reakcji masztu z odciągami na obciążenie parasejsmiczne przyjęto jako wymuszenie drgania gruntu (poziome i pionowe) wywołane wstrząsem górniczym, zarejestrowane 21 maja 2006 r. przy ulicy 3 Maja w Polkowicach. Odległość epicentralna

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

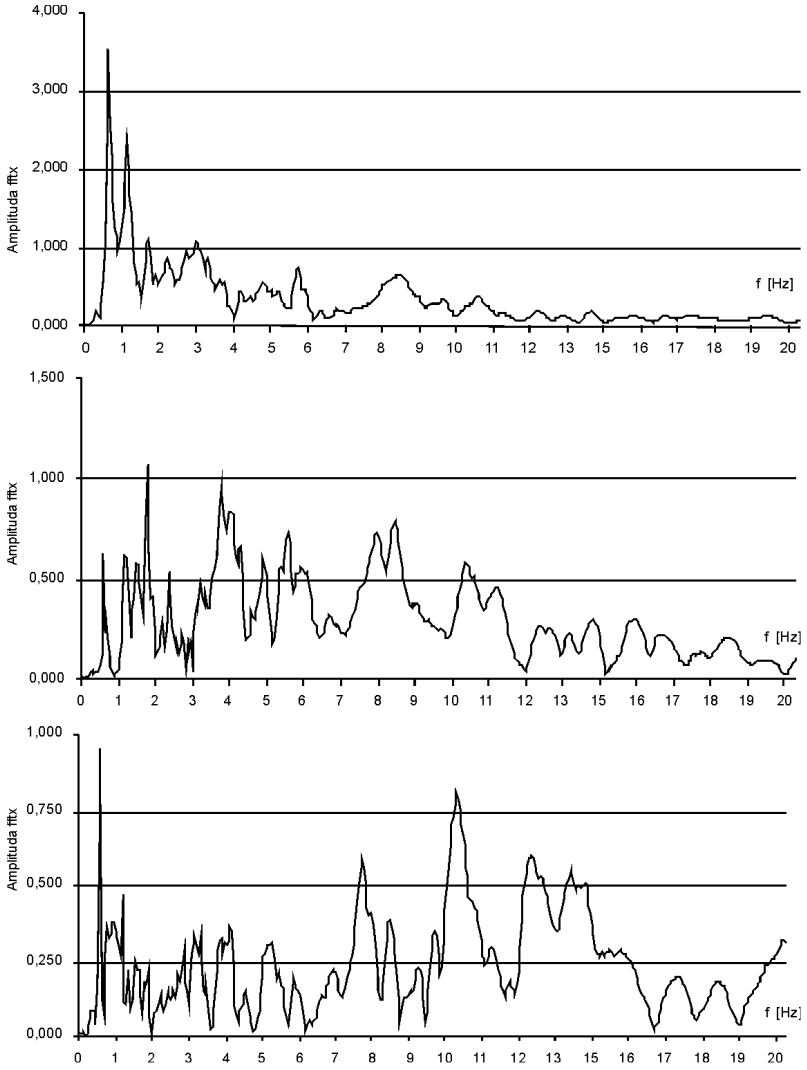
wynosiła 1330 m, zaś wartość energii w źródle drgań została określona jako En = = 1,9 · 109 J. Zarejestrowano 3 składowe drgań gruntu (poziome: radialną *x* i transwersalną *y* oraz pionową *z*), których przebiegi czasowe przedstawiono na rys. 3, zaś analizy częstotliwościowe tych przebiegów zamieszczono na rys. 4. Należy zaznaczyć, że spośród wstrząsów zarejestrowanych na obszarze LGOM jest to jeden z największych pod względem wartości amplitud przemieszczeń powierzchni gruntu (największe amplitudy przyspieszeń i najmniejsze wartości dominującej częstotliwości drgań).



Rys. 3. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań powierzchniowych gruntu kolejno w kierunku radialnym *x*, transwersalnym *y* oraz pionowym *z*

Fig. 3. Time traces of surface ground vibrations for radial direction *x*, transversal *y* and vertical *z* respectively

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 4. Analizy *fft* poszczególnych składowych drgań powierzchniowych gruntu: radialnej *x*, transwersalnej *y* i pionowej *z*

Fig. 4. Analysis *fft* of surface ground vibrations for radial component *x*, transversal *y* and vertical *z* respectively

W analizie odpowiedzi konstrukcji masztu na to wymuszenie założono, że oś *x* jest zgodna z kierunkiem propagacji fali po powierzchni gruntu od źródła drgań do fundamentu trzonu masztu (jest to przecięcie płaszczyzny poziomej i płaszczyzny rozpiętej pomiędzy źródłem wymuszenia a osią trzonu masztu). Oś *y* jest osią poziomą prostopadłą do osi *x*, zaś *z* – osią pionową. Składowa radialna *x* charakteryzuje się niską dominującą częstotliwością drgań (0,70 Hz) i maksymalną amplitudą przyspieszeń 1,72 m/s^2, a udziały wyższych częstotliwości są znikome. Natomiast wymuszenia w kierunkach *y*

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

oraz z są o wiele bardziej złożone. Częstotliwości o wartościach poniżej 1 Hz są w nich mniej eksponowane.

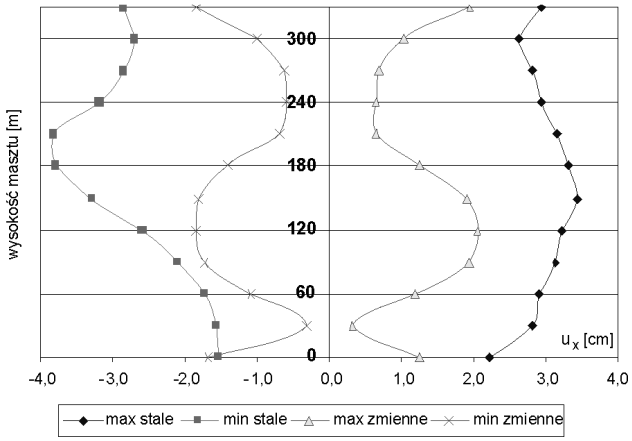
Założono, że fala ma charakter pakietu falowego w każdym z kierunków, a zmiana jej amplitud jest opisana wzorem (1). Wówczas zanik maksymalnej amplitudy przyspieszeń na obszarze, w którym jest zlokalizowana konstrukcja (rozstaw podpór w kierunku działania wymuszenia wynosi 540 m), jest mały. Przy założeniu, że amplituda przyspieszeń gruntu w najbardziej wysuniętym odciągu w kierunku źródła drgań wynosi 1, to w przypadku najodleglejszego odciągu ma ona wartość 0,97, co daje 3% zmiany amplitudy wymuszenia.

Ze względu na tak mały zakres zmiany amplitud przyspieszeń drgań gruntu zdecydowano się na analizę dwóch przypadków obliczeniowych:

1. Wymuszenie „stałe”, tj. o jednakowej amplitudzie – analiza konstrukcji pod wpływem wymuszenia jednakowego dla każdego styku konstrukcji z podłożem, przy założeniu opóźnienia czasowego dojścia fali do następnych podpór z prędkością 2 km/s.
2. Wymuszenie „zmienne”, tj. o zmiennej amplitudzie — analiza konstrukcji pod wpływem wymuszenia o amplitudzie zmieniającej swoją wartość po odległości według wzoru (1) i przy założeniu przesunięcia w czasie momentu dojścia sygnału do poszczególnych fundamentów (efekt fali wędrującej).

4. Wyniki analizy odpowiedzi dynamicznej konstrukcji masztu

Obliczone z zastosowaniem obu wymuszeń (o stałej i o zmiennej amplitudzie) maksymalne i minimalne wartości przemieszczeń charakterystycznych punktów trzonu masztu zestawiono na rysunkach 5–7. Są to wartości niewielkie, jak na konstrukcję masztu z odciągami. Uzyskane wyniki wskazują natomiast, podobnie jak w przypadku obciążeń typu sejsmicznego, na dość dużą wrażliwość konstrukcji na sposób realizacji wymuszenia.

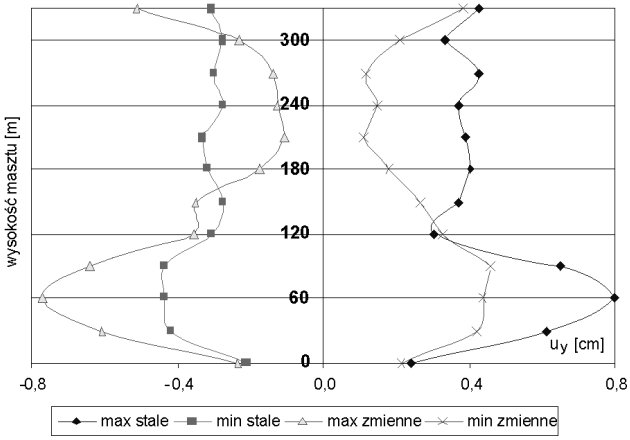


Rys. 5. Maksymalne (max) i minimalne (min.) wartości przemieszczeń poziomych trzonu masztu w kierunku *x* przy wymuszeniu o jednakowej (stałe) lub o zmiennej (zmienne) apmlitudzie

Fig. 5. Maximum (max) and minimum (min) value of horizontal displacements of mast core in direction *x* for constant or changeable amplitude of excitation

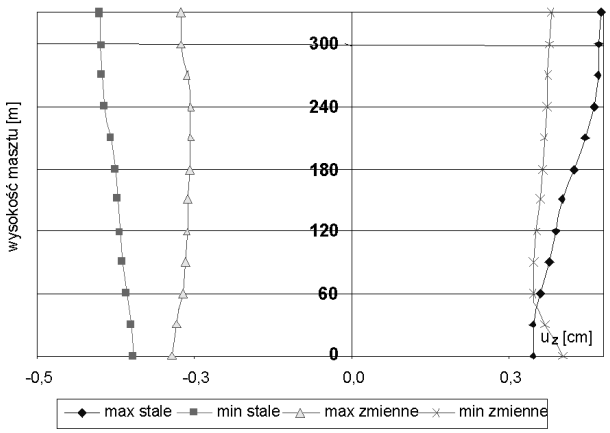
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W odniesieniu do składowej poziomej *x* oraz pionowej *z* ekstremalne wartości przemieszczeń charakterystycznych punktów trzonu masztu wystąpiły podczas wymuszenia o jednakowej amplitudzie i fazie drgań. Natomiast ekstremalne wartości składowej poziomej w kierunku *y* pojawiły się w niektórych punktach trzonu masztu (np. na jego wierzchołku) podczas przyjęcia wymuszenia zmiennego. Wydaje się więc, że żadnego z tych dwu przypadków realizacji wymuszenia nie można pominąć w analizie odpowiedzi konstrukcji na wpływy parasejsmiczne.



Rys. 6. Maksymalne (max) i minimalne (min.) wartości przemieszczeń poziomych trzonu masztu w kierunku *y* przy wymuszeniu o jednakowej (stałe) lub o zmiennej (zmienne) amplitudzie

Fig. 6. Maximum (max) and minimum (min) value of horizontal displacements of mast core in direction *y* for constant or changeable amplitude of excitation



Rys. 7. Maksymalne (max) i minimalne (min.) wartości przemieszczeń pionowych trzonu masztu (kierunek *z*) przy wymuszeniu o jednakowej (stałe) lub o zmiennej (zmienne) amplitudzie

Fig. 7. Maximum (max) and minimum (min) value of vertical displacements of mast core in direction *x* for constant or changeable amplitude of excitation

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Generalnie, wraz z wysokością masztu rosną przemieszczenia punktów trzonu. Zmianie ulega też stosunek przemieszczeń w różnych kierunkach. Nie da się jednak ustalić jakiejś prawidłowości tych zmian.

W tabeli 1 zestawiono ekstremalne wartości amplitud sił w odciągach, jakie wystąpią pod wpływem rozważanego wymuszenia parasejsmicznego oraz wyrażono w procentach, o ile uległy one zmianie w stosunku do wartości siły napięcia pierwotnego w danym odciągu. Uzyskane wyniki potwierdzają fakt, że w przypadku wymuszenia kinematycznego ruchem podłoża (wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne) ekstremalne wzrosty sił w odciągach uzyskuje się, gdy to wymuszenie realizowane jest jako „stałe" (o jednakowej amplitudzie).

Tabela 1

Ekstremalne wartości sił w odciągach pod wpływem rozważanego wymuszenia parasejsmicznego oraz procentowy wskaźnik ich zmiany w stosunku do pierwotnej wartości siły naciągu (1, 2, 3, 4, 5 – poziomy odciągów ponumerowane od najniższego)

Wymuszenie	Wartość	Siły w odciągach									
		odciągi w płaszczyźnie zapadnięcia					odciągi poza płaszczyzną zapadnięcia				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Stałe	max	–128	–140	–145	–183	–284	–95	–138	–143	–195	–281
	min.	–180	–166	–165	–230	-299	–177	–162	–166	–222	–301
	wzrost [%]	24%	11%	6%	11%	3%	22%	8%	7%	7%	4%
Zmienne	max	wył	–142	–151	–201	–286	–125	–141	–151	–204	–287
	min.	–160	–159	–158	–213	–294	–162	–158	–158	–209	-293
	wzrost [%]	10%	6%	2%	3%	1%	12%	6%	2%	1%	1%

Analiza odpowiedzi konstrukcji na rozważane tu wymuszenie parasejsmiczne obejmowała również określenie ekstremalnych sił przekrojowych w trzonie masztu. Dodatkowe wzrosty sił osiowych (tab. 2) na poszczególnych poziomach wysokości są bardzo małe (do 9% w górnych partiach trzonu na wysokości 300 m), a rozkład ich wartości jest uzależniony od sposobu realizacji wymuszenia (stałe lub zmienne).

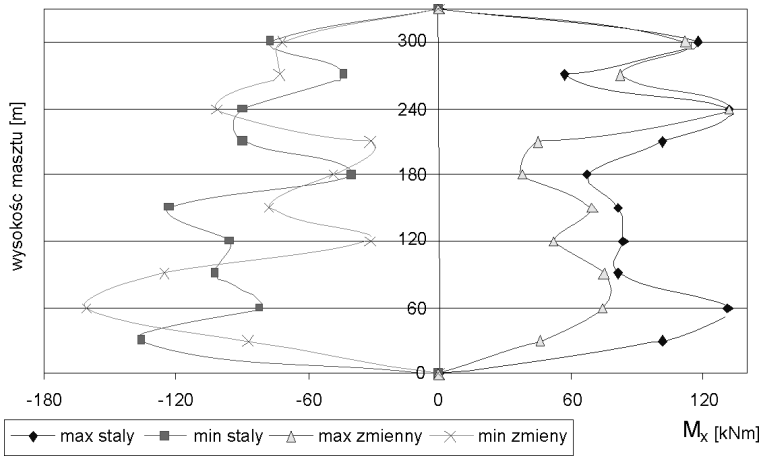
Tabela 2

Ekstremalne wartości sił osiowych w wybranych punktach trzonu masztu (0, 30 ... 330 – wysokość podana w metrach)

Wymuszenie	Wartość	Dodatkowe wartości sił osiowych z–z [kN]											
		0	**30**	**60**	**90**	**120**	**150**	**180**	**210**	**240**	**270**	**300**	**330**
Wyjście		**2883**	**2804**	**2416**	**2337**	**1939**	**1860**	**1452**	**1372**	**854**	**774**	**79**	**0**
Stałe	max	2926	2842	2455	2369	1972	1887	1481	1396	878	796	87	0
	min.	2835	2756	2377	2296	1899	1817	1411	1339	833	760	74	0
	wzrost [%]	1%	1%	2%	1%	2%	1%	2%	2%	3%	3%	9%	–
Zmienne	max	3010	2929	2503	2418	1996	1916	1498	1419	881	796	87	0
	min.	2768	2684	2316	2251	1867	1796	1398	1321	825	749	72	0
	wzrost [%]	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	9%	–

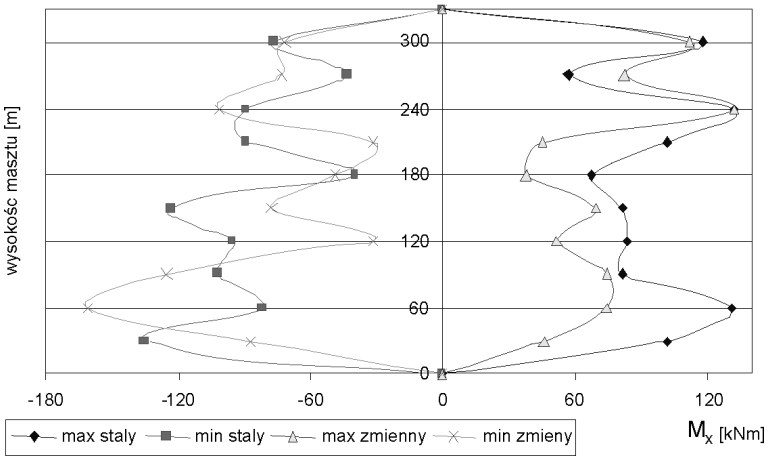
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Można zauważyć, że nie zawsze wartości momentów zginających osiągają wartości ekstremalne w miejscu podparcia trzonu podporą odciągową (rys. 8 i 9). Przyczyną takiego stanu rzeczy jest sztywność podparcia, która dodatkowo ulega zmianie podczas ruchu konstrukcji.



Rys. 8. Maksymalne (max) i minimalne (min.) wartości momentów zginających trzon – *Mx* [kNm] przy wymuszeniu o jednakowej (stałe) lub o zmiennej (zmienne) amplitudzie

Fig. 8. Maximum (max) and minimum (min) value of bending moments of mast core – *Mx* [kNm] for constant or changeable amplitude of excitation



Rys. 9. Maksymalne (max) i minimalne (min.) wartości momentów zginających trzon – *My* [kNm] przy wymuszeniu o jednakowej (stałe) lub o zmiennej (zmienne) amplitudzie

Fig. 9. Maximum (max) and minimum (min) value of bending moments of mast core – *My* [kNm] for constant or changeable amplitude of excitation

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wnioski

W celu uzyskania najniekorzystniejszych wartości sił przekrojowych i przemieszczeń trzonu masztu oraz sił w jego odciągach należy analizować oba przypadki wymuszenia, tj. o jednakowej wartości amplitudy drgań gruntu w każdym punkcie podparcia (podparcie trzonu masztu i punkty kotwienia odciągów) oraz o zmiennej wartości tej amplitudy w poszczególnych punktach podparcia (efekt fali wędrującej).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że o odpowiedzi masztu na wzbudzenia kinematyczne (ruchem podłoża) decydują niższe częstotliwości, zbliżone do pierwszych częstotliwości drgań własnych masztu. Udział wyższych częstotliwości jest zdecydowanie mniejszy. Uzyskane z analiz wartości przemieszczeń są niższe od wartości dopuszczalnych ze względu na stan graniczny użytkowania masztu z odciągami.

Literatura

[1] Amiri G., *Seismic Sensitivity Indicators for Tall Guyed Telecommunication Towers*, Computers and Structures, 80, 2002, 349-364.
[2] Dulińska J., *Odpowiedź dynamiczna budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego*, Monografia 338, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
[3] Hensely G., *Finite Element Analysis of the Seismic Behaviour of Guyed Masts*, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
[4] Madugula M., Wahba Y., Monforton G.R., *Dynamic Response of Guyed Masts*, Engineering Structures, Vol. 20, No. 12, 1998, 1097-1101.
[5] Madugula M., *Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts*, ASCE, Codes, Virginia 2002.
[6] Nabil B.K., *Response of guyed tower to a guy rupture under no wind pressure*, Engeenering Structures, vol. 22, 699-706.
[7] Nabil B.K., *Dynamic analysis of guyed towers*, Engeenering Structures, 16 (4), 1994, 287-301.
[8] Nabil B.K., *Nonlinear dynamic response of a guyed tower to sudden guy rupture*, Engeenering Structures, vol. 19, No. 11, 879-890.
[9] Sparling B.F., Smith B.W., Davenport A.G., *Simplified Dynamic Analysis Methods for Guyed Masts in Turbulent Winds*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 37(2), 1996, 89-106.
[10] Tatara T., *Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną*, Zeszyty Naukowe PK, seria Inżynieria Lądowa, nr 74/2002, Kraków 2002.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ