

DRGANIA STALOWEJ KONSTRUKCJI WSPORCZEJ LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ WYSOKIEGO NAPIĘCIA WYWOŁANE WYMUSZENIEM KINEMATYCZNYM

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy dynamicznej stalowej konstrukcji wsporczej pod napowietrzną linię elektroenergetyczną. Celem analizy było określenie wpływu oddziaływań parasejsmicznych na pracę urządzenia precyzyjnego zamontowanego w punktach na poprzeczniku, do których poprzez izolatory podwieszane są przewody aluminiowo-stalowe. Do rozważań przyjęto przelotowy słup linii 220kV. W programie Abaqus zbudowano przestrzenny model słupa. Rozpatrzono dwa rodzaje podparcia konstrukcji - sztywne i sprężyste, które w uproszczony sposób uwzględniło interakcję z gruntem. Przeprowadzono analizę modalną, której wynikiem są częstotliwości oraz postacie drgań własnych konstrukcji. Następnie dokonano analizy dynamicznej z wykorzystaniem metod bezpośredniego całkowania równań ruchu. Jej efektem jest odpowiedź dynamiczna konstrukcji w formie przebiegów czasowych prędkości wybranych punktów znajdujących się na poprzeczniku słupa. Uzyskane przebiegi czasowe prędkości poddano transformacji Fouriera, której wynikiem są widma drgań. Dla wybranych punktów obliczono wartości skuteczne prędkości i porównano z dopuszczalnymi, zalecanymi przez normę PN-85/B-02170.

WSTĘP

Zwiększanie produkcji energii elektrycznej, związane ze wzrostem zapotrzebowania na nią, nierozwalnie wiąże się z rozbudową i modernizacją sieci przesyłowej. Przewody w liniach napowietrznych zawieszane są na konstrukcjach wsporczych, którymi są słupy stalowe lub betonowe, a przy liniach niskiego napięcia też drewniane. Typy i rodzaje konstrukcji wsporczych można znaleźć np. w pracy [3].

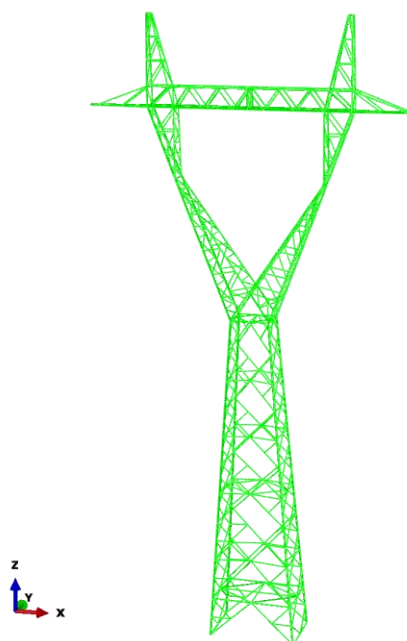
Podstawową funkcją konstrukcji wsporczej jest przeniesienie ciężaru przewodów, izolatorów oraz projektowych obciążeń zmiennych, przy zachowaniu właściwych odległości pomiędzy przewodami oraz pomiędzy przewodami a konstrukcjami wsporczymi i innymi obiektami sąsiadującymi z linią elektroenergetyczną, tzw. odstępów izolacyjnych.

Konstrukcje wsporcze nie powinny również w nadmierny sposób przekazywać drgań z podłoża na przewody ani też na ewentualne urządzenia montowane na słupach, służące do monitoringu linii elektroenergetycznych. Celem referatu jest określenie wpływu oddziaływań parasejsmicznych przekazywanych na konstrukcję przez podłoże na pracę takiego urządzenia precyzyjnego. Przeprowadzenie analizy dynamicznej konstrukcji wsporczej linii wysokiego napięcia może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa przesyłu.

1. OPIS ANALIZOWANEJ KONSTRUKCJI WSPORCZEJ

Przedmiotem analizy jest kratowy słup stalowy stanowiący jeden z typów konstrukcji wsporczej linii elektroenergetycznej 220kV. Jest to słup typu przelotowego o oznaczeniu H52P, jednotorowy, stosowany w płaskim układzie zawieszenia przewodów. Wysokość całkowita słupa wynosi 30,8 m, wysokość do poprzeczника 26,5 m, a jego masa jest równa 4255 kg. Słup wykonany jest ze stali S235JRG2 z kątowników równo- i nierównoramiennych. Konstrukcję słupa stanowi układ przestrzenny prętów łączonych na śruby ze skratowaniami podwójnymi, rybkowymi. Słup oparty jest na typowych fundamentach stopowych, dobieranych w zależności od warunków gruntowych.

wych fundamentach stopowych, dobieranych w zależności od warunków gruntowych.



Rys. 1. Model numeryczny analizowanej konstrukcji wsporczej

1.1. Opis modelu MES słupa

Analizowany słup został zamodelowany jako rama przestrzenna o węzłach sztywnych w programie Abaqus. Założono, że słup został wykonany ze stali o module Younga $E = 200$ GPa i współczynnika Poissona $\nu = 0,3$. Zastosowano elementy belkowe o oznaczeniu b33 (patrz [1]), które realizują model belki Bernoulliego-Eulera i w statyce dają rozwiązanie ściśle w ramach tej teorii. Konstrukcja została podzielona na 3586 elementów skończonych o 6672 węzłach, co w efekcie dało 25722 zmienne do analizy.

1.2. Opis zastosowanych warunków brzegowych

Analizowano dwa rodzaje podparcia konstrukcji: przegubowe nieprzesuwne oraz podparcie sprężyste w kierunku "z" (zgodnie z układem współrzędnych z rysunku 1) i sztywne w pozostałych dwóch kierunkach. Sztywność podpór sprężystych wyznaczono na podstawie [6]. Przyjęto następujące dane dla gruntu: piasek średni o module odkształcenia $E_0 = 70 \text{ MPa}$ i współczynniku rozszerzalności bocznej $\nu_0 = 0,23$. Dla fundamentu o kształcie koła w planie, współczynnik wpływu wynosi $\omega = 1,0$. Współczynnik sztywności podłoża wyznaczono według wzoru (1).

$$k = \frac{E_0}{\omega \cdot B \cdot (1 - \nu_0^2)} = \frac{70}{1 \cdot 2,3 \cdot (1 - 0,23^2)} = 32,13 \left[\frac{\text{MPa}}{\text{m}} \right] \quad (1)$$

Zastępczy współczynnik sztywności dla fundamentu uzyskano następująco:

$$k_z = k \cdot A = k \cdot \frac{\pi \cdot B^2}{4} = 32,13 \cdot \frac{\pi \cdot 2,3^2}{4} = 133,49 \left[\frac{\text{MN}}{\text{m}} \right] \quad (2)$$

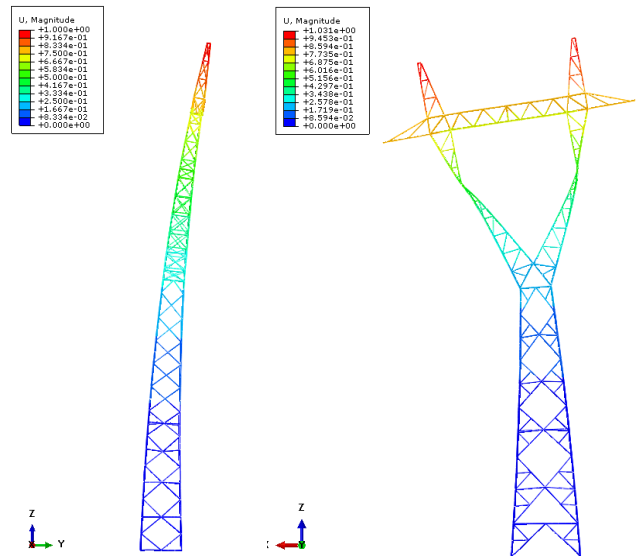
2. ANALIZA MODALNA

Częstotliwości i postaci drgań własnych zostały znalezione przy zastosowaniu algorytmu iteracji podprzestrzennych zaimplementowanego w programie Abaqus. Poniżej zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy. W tabelicy 1 zestawiono 20 najniższych częstotliwości drgań własnych, zarówno przy podparciu sztywnym jak i sprężystym. Różnice widoczne pomiędzy tymi częstotliwościami są poniżej 1% a jedynie przy 1, 2, 4 i 5 częstotliwości wynoszą do 6%.

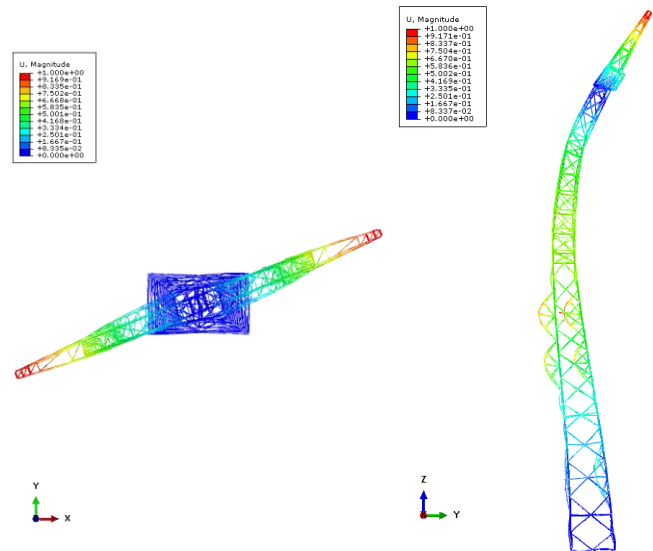
Tab. 1. Zestawienie 20 najniższych częstotliwości drgań własnych

Numer	Częstotliwość [Hz]	
	Podparcie sztywne	Podparcie sprężyste
1	1,70	1,59
2	2,39	2,28
3	2,87	2,86
4	7,16	6,79
5	8,93	8,41
6	9,46	9,46
7	10,73	10,71
8	11,76	11,76
9	12,34	12,30
10	13,97	13,96
11	14,53	14,52
12	14,88	14,78
13	14,90	14,88
14	15,88	15,74
15	18,01	17,79
16	18,96	18,95
17	19,06	19,00
18	19,21	19,12
19	19,32	19,21
20	19,67	19,66

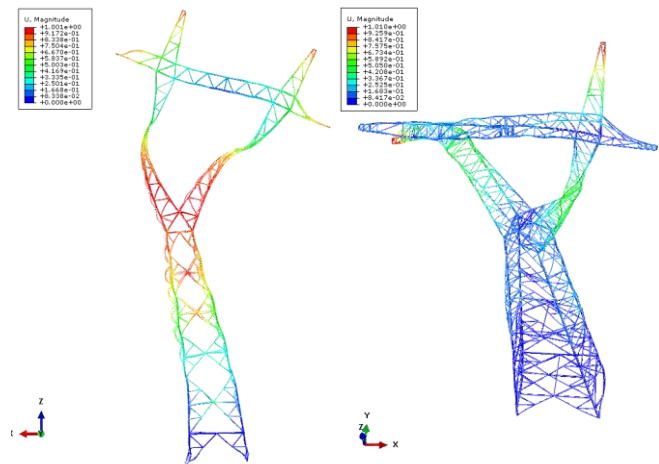
Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono wybrane postaci drgań własnych. W obydwu przypadkach podparcia postaci mają zbliżony charakter.



Rys. 2. Pierwsza ($f = 1,70 \text{ Hz}$) i druga ($f = 2,39 \text{ Hz}$) postać drgań własnych



Rys. 3. Trzecia ($f = 2,87 \text{ Hz}$) i czwarta ($f = 7,16 \text{ Hz}$) postać drgań własnych



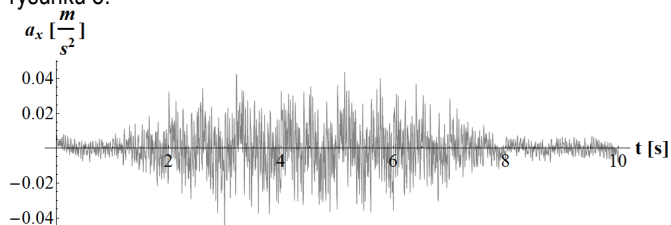
Rys. 4. Piąta ($f = 8,73 \text{ Hz}$) i dziesiąta ($f = 13,97 \text{ Hz}$) postać drgań własnych

3. ANALIZA DYNAMICZNA

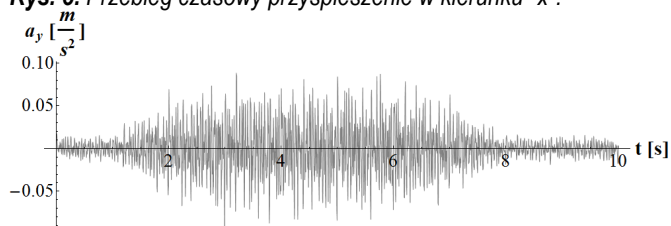
3.1. Zastosowane wymuszenie

Do analizy przyjęto pomierzone wymuszenie pochodzenia komunikacyjnego o długości 10 s, i znajdujące się w zasobach Zakładu Mechaniki Budowli i Zastosowań Informatyki. Tego typu wymuszenie wykorzystywane było również w pracy [7].

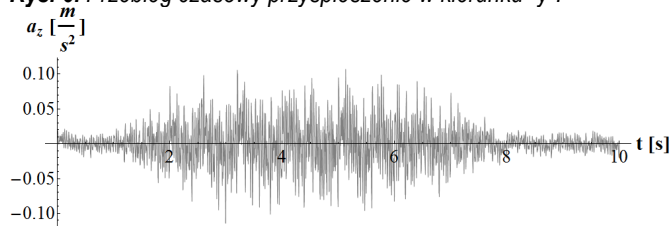
Przebiegi czasowe przyspieszeń w trzech kierunkach zgodnych z przyjętym układem współrzędnych pokazano na rysunkach 5-7. Sposób przyłożenia wymuszenia do konstrukcji pokazano na rysunku 8.



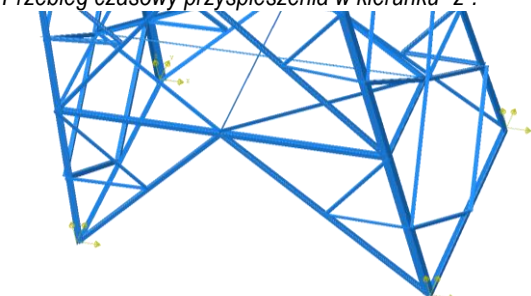
Rys. 5. Przebieg czasowy przyspieszenia w kierunku "x".



Rys. 6. Przebieg czasowy przyspieszenia w kierunku "y".



Rys. 7. Przebieg czasowy przyspieszenia w kierunku "z".



Rys. 8. Warunki brzegowe przyjęte do analizy.

3.2. Metodyka obliczeń

Odpowiedź dynamiczną układu znaleziono przy zastosowaniu solvera Abaqus/Standard Implicit, który korzysta z niejawnego schematu bezpośredniego całkowania równań ruchu (3) – metody Hiblera-Hughesa-Taylora (patrz [1]).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (3)$$

gdzie:

$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ - wektor współrzędnych uogólnionych i jego pochodne,

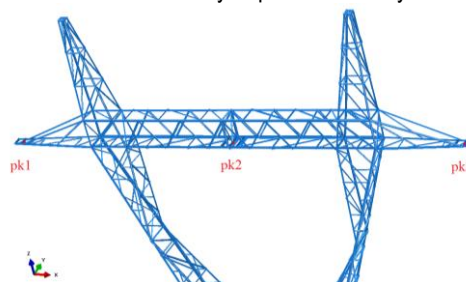
\mathbf{M} - macierz mas,

\mathbf{C} - macierz tłumienia (pominięto w analizie),

\mathbf{K} - macierz sztywności,

\mathbf{Q} - wektor obciążeń węzłowych.

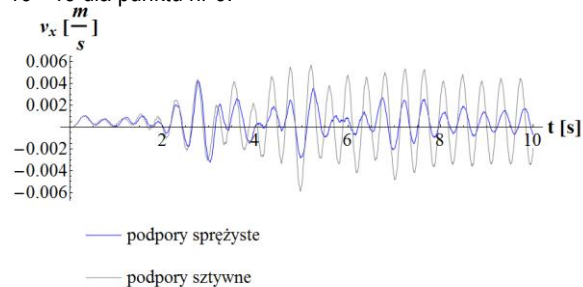
Krok całkowania przyjęto równy 0,001 s. W trakcie analizy w każdej chwili czasowej zbierano prędkości dla trzech punktów kontrolnych. Punkty kontrolne znajdują się na poprzeczniku słupa, do których za pośrednictwem izolatorów podwieszono są przewody aluminiowo-stalowe. Punkty te pokazano na rysunku 8.



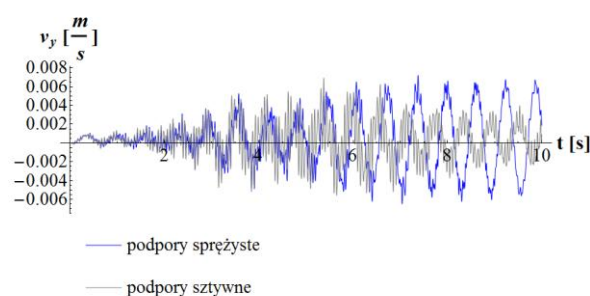
Rys. 9. Lokalizacja punktów kontrolnych, dla których analizowano odpowiedź dynamiczną

3.3. Wyniki przeprowadzonej analizy

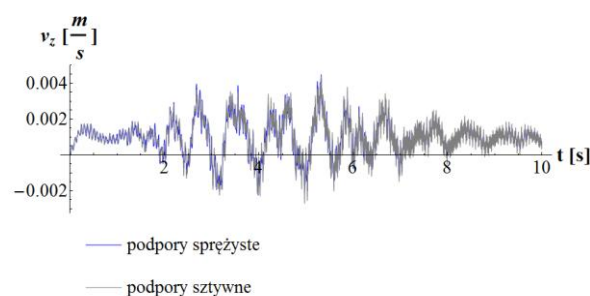
W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano przebiegi czasowe prędkości w trzech kierunkach zgodnych z przyjętym układem współrzędnych dla trzech punktów kontrolnych. Na rysunkach 10 - 12 pokazano składowe prędkości dla punktu nr 2, a na rysunkach 13 - 15 dla punktu nr 3.



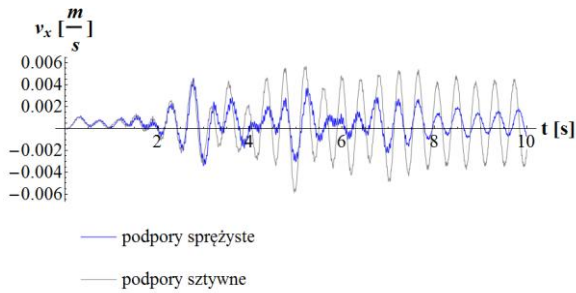
Rys. 10. Prędkość punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "x" w funkcji czasu.



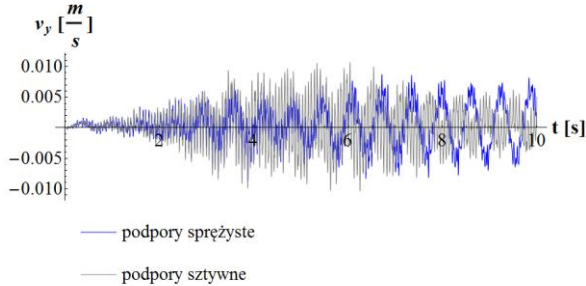
Rys. 11. Prędkość punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "y" w funkcji czasu



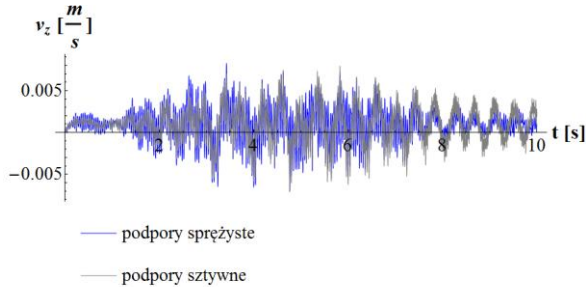
Rys. 12. Prędkość punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "z" w funkcji czasu



Rys. 13. Prędkość punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "x" w funkcji czasu

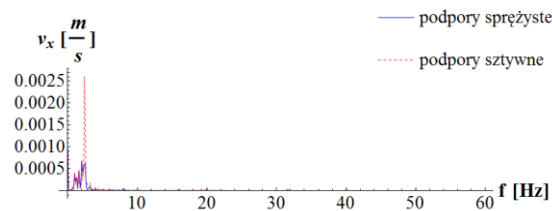


Rys. 14. Prędkość punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "y" w funkcji czasu

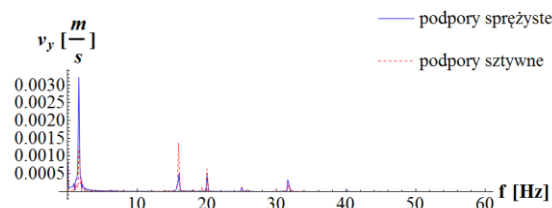


Rys. 15. Prędkość punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "z" w funkcji czasu

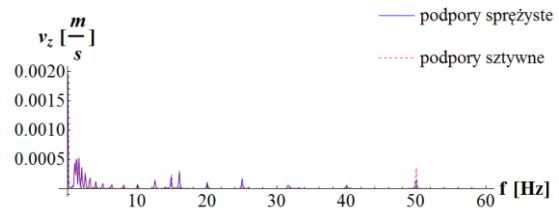
Dla otrzymanych wartości prędkości w funkcji czasu przeprowadzono analizę harmoniczną z wykorzystaniem tzw. szybkiej transformacji Fouriera (FFT ang. *Fast Fourier Transform*) (patrz [5]). W jej wyniku uzyskano widma prędkości drgań, które pokazano rysunkach 16-18 dla punktu kontrolnego nr 2, a na rysunkach 19-21 dla punktu kontrolnego nr 3. Rysunki pokazują zakresy częstotliwości (do 60 Hz) gdzie amplitudy prędkości były wyższe niż 0,0001 m/s.



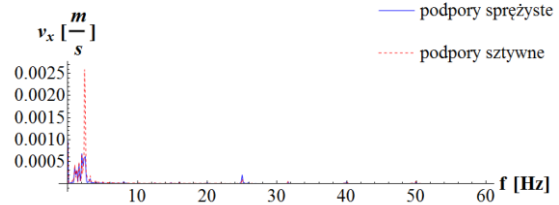
Rys. 16. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "x"



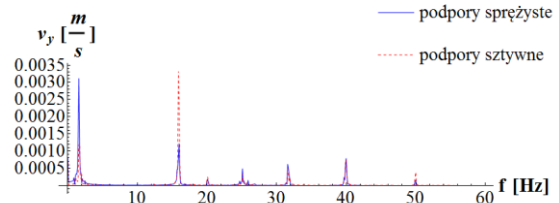
Rys. 17. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "y"



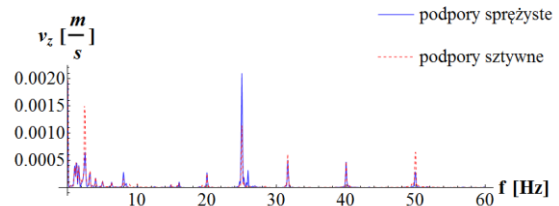
Rys. 18. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 2 w kierunku "z"



Rys. 19. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "x"



Rys. 20. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "y"



Rys. 21. Widmo prędkości drgań punktu kontrolnego nr 3 w kierunku "z"

3.4. Ocena wpływu drgań na pracę urządzenia precyzyjnego

Do oceny wpływu drgań pracę urządzenia precyzyjnego konieczne jest wyznaczenie tzw. wartości skutecznych prędkości (RMS ang. *Root Mean Square*). Obliczone wartości skuteczne prędkości (RMS) dla trzech kierunków można porównywać z prędkościami dopuszczalnymi podawanymi przez producenta urządzenia lub z wartością określoną w tablicy 5 normy [4].

Na potrzeby tej pracy przyjęto, że urządzenie można zaliczyć do I klasy wrażliwości na wpływy dynamiczne i wówczas dopuszczalna wartość skuteczna prędkości wynosi 0,0001 m/s. Wartości skuteczne dla punktów kontrolnych zestawiono w tablicy 2.

Tab. 2. Zestawienie wartości skutecznych prędkości w punktach kontrolnych

Punkt kontrolny	Podparcie sztywne		
	RMS v_x	RMS v_y	RMS v_z
1	0,0024720	0,0034330	0,00217011
2	0,0024838	0,0019184	0,00098589
3	0,0024703	0,0033842	0,0021114
Punkt kontrolny	Podparcie sprężyste		
	RMS v_x	RMS v_x	RMS v_x
1	0,0011804	0,0011804	0,0011804
2	0,0011727	0,0011727	0,0011727
3	0,0011786	0,0031138	0,0020887

Z tablicy 2 wynika, że dla urządzeń o I klasie wrażliwości wartości skuteczne prędkości przekraczają wartość dopuszczalną dla wszystkich punktów kontrolnych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wykazała, że efekty oddziaływań dynamicznych pochodzących od wymuszeń kinematycznych, na pracę urządzenia precyzyjnego zamontowanego w punktach zawieszenia przewodów, nie mogą być pomijane. Wartości dopuszczalne prędkości są przekroczone we wszystkich punktach kontrolnych.

Można zatem stwierdzić, że w przypadku, gdy planowane jest wyposażenie stalowej konstrukcji wsporczej w urządzenia precyzyjne, konieczne jest przeprowadzenie analizy drgań słupa pochodzących od wymuszeń kinematycznych wywołanych komunikacją i określenie ich wpływu na te urządzenia.

Widoczne są większe prędkości w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 5 Hz). W punkcie 3 na końcu części wspornikowej poprzeczniaka pojawiają się znaczne wartości amplitud prędkości w kierunku "y" przy ok. 16 Hz a w kierunku "z" przy ok. 25 Hz.

BIBLIOGRAFIA

1. Abaqus Analysis User's Manual, Ver. 6.12. Dassault Systèmes 2012.
2. Ciesielski R., Maciąg E., Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. WKiŁ, Warszawa 1990.
3. Mendera Z., Szojda L., Wandzik G., Stalowe konstrukcje wsporcze napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia. PWN, Warszawa 2012.
4. PN-85/B-02170, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
5. Szabatin J., Podstawy teorii sygnałów, WKiŁ. Warszawa 1982.
6. Wiłun Z., Zarys geotechniki, WKiŁ. Warszawa 2000.
7. Zbiciak A., Kozyra Z., Józefiak K., Analiza MES wpływu drgań od metra na budynek, TTS Technika Transportu Szynowego 2012, nr 9, 3033-3041.

VIBRATIONS OF AN ELECTRICITY PYLON CAUSED BY KINEMATIC EXCITATION

Abstract

The paper presents a dynamic analysis of the electricity pylon. The aim of the analysis was to determine the influence of parasismic actions on a precision device installed in points on a crossarm, in which aluminium conductors steel-reinforced are mounted through isolators. The a-type pylon 220 kV was investigated. The 3D numerical model of the pylon was built in Abaqus program. The two different types of supports were compared - rigid and elastic, which comply interaction with soil in a simplified way. The modal analysis was submitted - natural frequencies and modes were received. Then solution of the dynamic analysis was found with implicit direct integration of motion equations methods. Velocities as functions of time for selected points were calculated during the analysis. Amplitude-frequency characteristics were determined using Fourier transform. For selected points RMS velocities were calculated and compared with requirements of the norm PN-85/B-02170.

Autorzy:

inż. **Sławomir Dudziak** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej; 00-637 Warszawa; Al. Armii Ludowej 16. mail: smdudziak@gmail.com

dr inż. **Zofia Kozyra** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej; 00-637 Warszawa; Al. Armii Ludowej 16. mail: z.kozyra@il.pw.edu.pl

Praca w projekcie „Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych” jest dofinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w ramach konkursu GEKON (NCBR/214108).