

Grzegorz BROŻEK¹

SYMULACJA ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH OBIEKTU WIBROIZOLOWANEGO

Celem artykułu jest przedstawianie zastosowania metody elementów skończonych do projektowania obiektów wymagających zastosowania wibroizolacji. Jako obiekt badawczy został wybrany generator o mocy 113 MW pracujący w jednej z elektrociepłowni na terenie województwa śląskiego. Przeprowadzono szereg analiz dynamicznych w dziedzinie częstotliwości dla trzech różnych modeli celem weryfikacji wpływu zastosowania wibroizolacji na poziom przyspieszeń na fundamencie generatora. W analizie wykorzystano wyniki pomiarów amplitud przyspieszenia drgań wykonanych przez pracowników Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH w celu weryfikacji modelu obliczeniowego. Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38.

SIMULATION OF DYNAMIC RESPONSE OF VIBROISOLATED OBJECT

This paper presents application of finite element method in designing of objects requiring use of vibroisolation. Generator of 113 MW was chosen as a test model. This generator is used in one of power plants in Silesia district. Several dynamic analysis in frequency domain was performed for three different models to verify influence of vibroisolation on acceleration level on foundation. For purposes of analysis, results of acceleration measurements were used. Measurements of vibration acceleration amplitudes was done by employees of the Department of Robotics and Mechatronics AGH during research project 4875/B/TO2/2010/38.

1. WPROWADZENIE

Artykuł przedstawia wykorzystanie metody elementów skończonych do analizy zachowania się wibroizolacji zastosowanej w fundamencie zespołu turbogeneratora o mocy 113 MW. Fundament został osadzony na sześciu słupach oddzielonych wibroizolacją opartą na pakietach sprężyn śrubowych. Zostały wykonane analizy dynamiczne oparte na zasadzie superpozycji modalnej, które pozwoliły ocenić skuteczność zastosowanej wibroizolacji biorąc pod uwagę wymagania stawiane fundamentom zespołów turbogeneratorów. Wyniki porównano z pomiarami eksperymentalnymi przyspieszeń wykonanymi przed i za wibroizolacją.

¹ EC Engineering Sp. z o.o.; ul. Opolska 100; 31-476 Kraków; tel. +48 12 627 77 03; e-mail: gbrozek@ec-e.pl

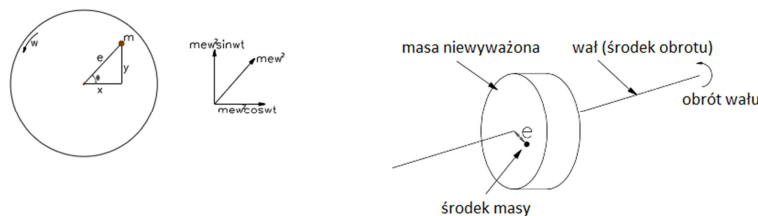
2. WYMAGANIA DOTYCZĄCE FUNDAMENTU ZESPOŁU TURBOGENERATORA

Podstawowe wymagania dotyczące fundamentów turbogeneratorów w porównaniu do innych maszyn odnoszą się do poniższych zagadnień:

1. Niedopuszczalny jest stan rezonansu przez co częstości własne fundamentu nie mogą być zbliżone z częstotliwościami pracy którejkolwiek z maszyn. Fundament może być wysoko zestrojony jeśli jego częstotliwości własne są powyżej częstotliwości pracy turbogeneratorsa lub nisko zestrojony jeśli jego częstotliwości własne są poniżej częstotliwości pracy.
2. Dopuszczalne amplitudy przemieszczenia w częstotliwościach pracy turbogeneratorsa nie mogą przekraczać wartości skrajnych określonych przez producenta podzespołów turbogeneratorsa.
3. Mimośród wymiaru bazowego względem którego przemieszcza się środek ciężkości nie może przekraczać 3% . Powód dla takiego wymagania to zminimalizowanie momentu bezwładności, który może znacząco wpłynąć na wartości częstotliwości własnych fundamentu.

3. SIŁA NIETYWAŻENIA JAKO GŁÓWNE OBCIĄŻENIE GENERATORA

Nietyważenie maszyn obrotowych jest częstym źródłem wymuszeń harmonicznych. Przyczynami nietyważenia mogą być m.in. braki materiałowe, tolerancje wykonania wałów prowadzące do powstawania sił bezwładności powodujących znaczący wzrost obciążenia łożysk. Inne czynniki wpływające na nietyważenie to np. wzrost temperatury wału, korozja, odprężanie materiału, uszkodzenie systemu chłodzenia.



Rys.1. Ilustracja definicji siły nietyważonej

Do obliczenia siły nietyważenia potrzebna jest wartość masy nietyważonej oraz jej odległość od osi obrotu. Siłę tę można obliczyć ze wzoru:

, gdzie:

m – masa nietyważona,

e – mimośród,

ω – prędkość obrotowa w rad/s.

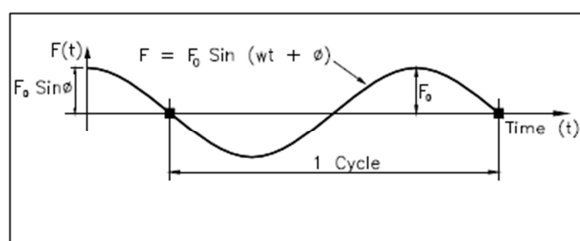
Współrzędne x, y masy nietyważonej są związane z kątem θ , gdzie :

Przyspieszenie masy nietyważonej w kierunku x, y można uzyskać przez dwukrotne różniczkowanie powyższych równań:

Przyspieszenie powoduje powstawanie harmonicznej siły niewyważonej, którą w przypadku braku danych od producenta maszyny należy wg IS 2974 (Code of practice for design and construction of machine foundations) wyznaczyć ze wzoru:

, gdzie:

φ – przesunięcie fazowe.



Rys.2. Przebieg siły niewyważonej w funkcji czasu

3.1 Obliczenie wartości mimośrod

Większość maszyn obrotowych jest wyważona zgodnie z wymaganiami producenta lub wg zaleceń klienta. Wg ISO 1940 klasa wyważenia G jest zależna od wartości mimośrod e wyrażonego w mm/s. Wg ISO 2974, turbo-generatory i podobne maszyny są zaliczane do klasy wyważenia G2.5 co oznacza mimośród o wartości 2.5 mm/s. Wyższa klasa G6.3 jest przewidziana m.in. dla fundamentów.

Standard ISO 1916 [6, 7] oraz niemiecki VDI [8] określają kryteria projektowania w funkcji dopuszczalnych amplitud przemieszczenia łożysk dla określonych częstotliwości pracy. Dla turbiny pracującej w częstotliwości pracy 50 Hz ta amplituda jest ograniczona do wartości 12.5 μm .

Znając klasę wyważenia G [mm/s], można obliczyć wartość mimośrod:

, gdzie:

e – mimośród w mm,

ω – prędkość obrotowa w rad/s.

4. WIBROIZOLACJA FUNDAMENTU GENERATORA

Prawidłowy dobór parametrów wibroizolacji jest jednym z najważniejszych aspektów procesu projektowania fundamentu generatora. Zadaniem wibroizolacji jest izolacja fundamentu od drgań pochodzących od obracających się maszyn poprzez odpowiednie dobranie częstości własnych wibroizolatorów pozostających zazwyczaj w bardzo niskich zakresach rzędu 1-5 Hz oraz zapewnienie prawidłowego podparcia statycznej masy generatora wraz z fundamentem.

Zastosowana wibroizolacja w postaci pakietów sprężyn śrubowych jest jednym z najpopularniejszych rozwiązań stosowanych w przemyśle. W badanym modelu, dla słupów zewnętrznych oraz środkowych zostały zastosowane różne wartości obciążenia tj. 1030 kN dla skrajnych oraz 1200 kN dla słupów środkowych. Każda z baterii składa się z 18 sprężyn. Zmierzone ugięcie statyczne to w przybliżeniu 15 mm.



Rys.3. Widok pakietu wibroizolacji dla jednego ze słupów

5. OPIS ZASTOSOWANEGO MODELU MES

Został wykonany model elementów skończonych generatora uwzględniający strukturę statora, wirnika oraz ramy na której posadowiono generator jak również strukturę fundamentu wraz z wibroizolacją oraz słupami na których posadowiono całość. Ze względu na brak dokładnych danych odnośnie wymiarów generatora oraz rozłożenia mas został wykonany uproszczony model, w którym część wymiarów została oszacowana na podstawie wizji lokalnej i pomiarów.

Wirnik został zamodelowany za pomocą elementów belkowych połączonych ze strukturą ramy za pomocą sztywnych elementów we wszystkich stopniach swobody.

Stator został zamodelowany poprzez zwiększenie gęstości żeber na których jest osadzony. Takie uproszczenie powoduje uwzględnienie wyłącznie efektu masowego uzwojenia oraz wszelkich elementów statora. Struktura żeber została zamodelowana za pomocą elementów powłokowych. Rury łączące żebra zostały zamodelowane za pomocą elementów belkowych.

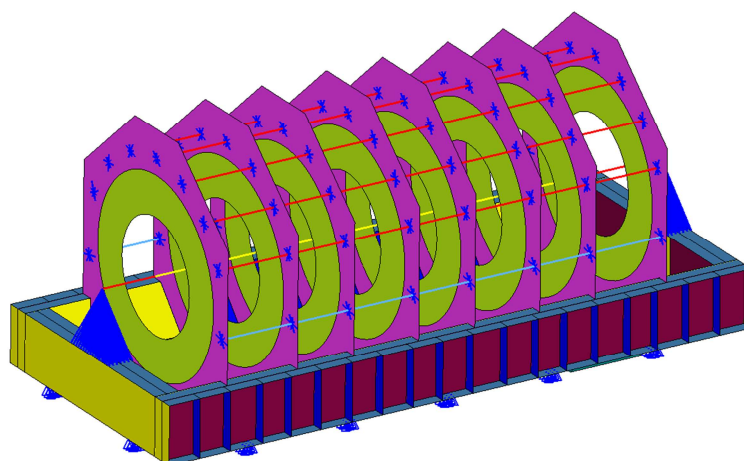
Rama oraz osłona dolna generatora zostały zamodelowane za pomocą elementów powłokowych z uwzględnieniem uźebrowania ramy oraz uproszczonego modelu odprowadzenia prądowego generatora.

Fundament został wykonany z elementów bryłowych ośmiowęzłowych bez uwzględnienia zbrojenia ze względu na brak danych. Dodatkowo wszystkie zewnętrzne powierzchnie betonu zostały pokryte blachą o grubości 5mm z elementów powłokowych. Grubość blachy na niektórych powierzchniach mogła mieć większą wartość.

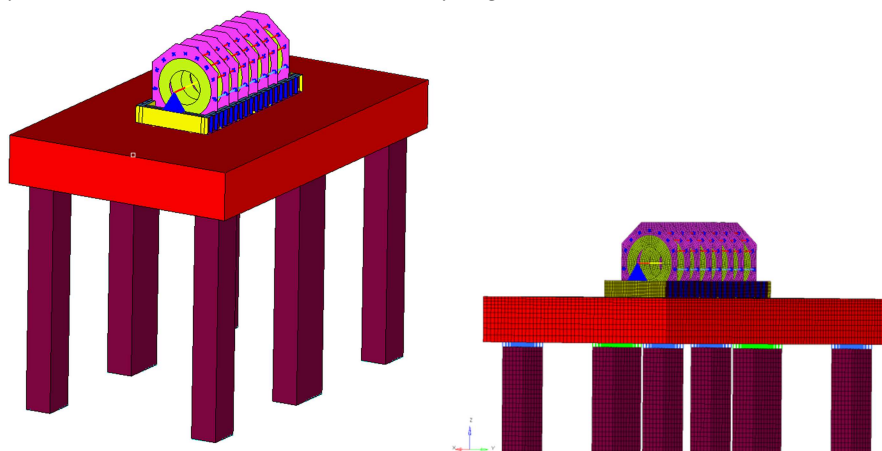
Wibroizolacja została zamodelowana za pomocą elementów BUSH umożliwiających dla pojedynczego elementu zdefiniowanie sztywności we wszystkich kierunkach jak również tłumienia.

W przypadku modelu bez zastosowanej wibroizolacji, słupy połączone z fundamentem generatora za pomocą sztywnych elementów typu RBE2 we wszystkich stopniach swobody.

Siatka elementów skończonych została wykonana z uwzględnieniem zalecenia dotyczącego ilości węzłów na długość najdłuższej fali w zakresie zainteresowania tj. do 200 Hz. Zakres ten wynika z maksymalnego zakresu w którym mogą pojawiać się znaczące częstotliwości własne osłony zidentyfikowane na podstawie pomiarów eksperymentalnych. Przeciętny rozmiar elementu skończonego to 50 mm przez co jest spełniony warunek uwzględnienia co najmniej 10 węzłów na jeden okres fali.



Rys.4. Widok modelu elementów skończonych generatora



Rys.5. Widok modelu elementów skończonych generatora wraz z fundamentem oraz wibroizolacją

5.1 Metodyka obliczeń oraz dane wejściowe

Analizy metodą elementów skończonych zostały wykonane w programie MSC. Nastran. Program ten jest uznany za standard w zakresie analiz dynamicznych. Analizy dynamiczne zostały oparte na zasadzie superpozycji modalnej polegającej na

wykonaniu symulacji w dwóch krokach. W pierwszym kroku wykonuje się analizę modalną celem której jest wyznaczenie w określonym zakresie częstości własnych oraz postaci modalnych. Zakres powinien być tak dobrany, żeby był około dwukrotnie wyższy niż najwyższa częstotliwość dla której wykonuje się analizy w drugim kroku tj. badanie odpowiedzi układu na wymuszenie dynamiczne w dziedzinie częstotliwości. Wymuszeniem jest wartość siły niewyważenia, która może się zmieniać w funkcji częstotliwości. Ze względu na stałą wartość obrotów wirnika tj. 3000 obr/min, częstotliwość siły wymuszającej miała stałą wartość.

Zaletą zastosowania podejścia z wykorzystaniem superpozycji modalnej polega na jednokrotnej analizie pierwszego kroku tj. analizie modalnej oraz możliwości wielokrotnego restartu analizy dla różnych wymuszeń oraz zakresów częstotliwości. Ogranicza to znacząco czas trwania analiz.

Ze względu na wyniki pomiarów drgań wskazujących na częstotliwość 100 Hz jako najbardziej krytyczną, analizy były wykonane w zakresie 0-130 Hz.

Siła niewyważenia była przyłożona na wirniku i składała się z dwóch składowych przesuniętych względem siebie o 90 stopni w celu zamodelowania ruchu obrotowego wibratora.

Wynikiem analiz oddziaływania dynamicznego obiektu są wartości przyspieszeń, przemieszczeń oraz m.in. naprężeń, które pozwalają określić trwałość zmęczeniową podzespołów narażonych na zbyt wysokie drgania.

Model obliczeniowy został utwierdzony w sześciu stopniach swobody w miejscu posadowienia słupów na których była osadzona cała konstrukcja fundamentu oraz generatora.

Przygotowano dwa różne modele:

- model ze sztywnym połączeniem słupów z fundamentem generatora,
- model dla wibroizolacji o wartościach nominalnych.

W tabeli 1 zestawiono najważniejsze dane materiałowe elementów składowych modelu MES. Dane te zostały przyjęte na podstawie dostępnej literatury.

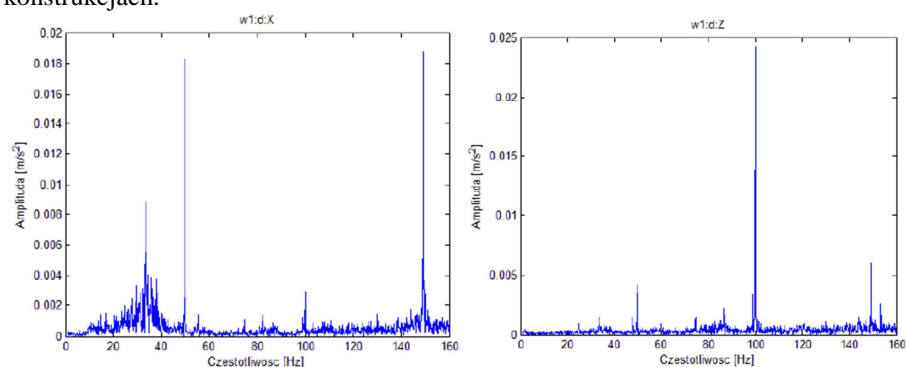
stal	
Gęstość [t/mm³]	7.86E-09
Współczynnik tłumienia	0.02
Współczynnik Poissone	0.3
Moduł Younga [MPa]	2.10E+05
beton	
Gęstość [t/mm³]	2.40E-09
Współczynnik tłumienia	0.02
Współczynnik Poissone	0.2
Moduł Younga [MPa]	30000

6. WYNIKI ANALIZY DYNAMICZNEJ

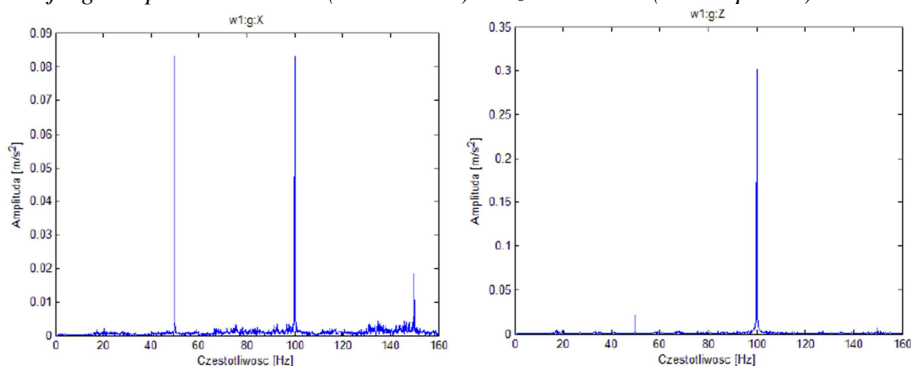
6.1 Wyniki badań eksperymentalnych

Przykładowe wyniki pomiarów zostały przedstawione w postaci wykresów przyspieszenia w dwóch kierunkach pomiarowych (X, Z) dla punktów poniżej oraz powyżej pakietów sprężyn wibroizolacyjnych (układ współrzędnych na rys. 8).

Wyniki pokazują wpływ wibroizolacji na poziom przyspieszeń zarówno w kierunku pionowym jak i poprzecznych. Amplituda w kierunku pionowym dla punktu pomiarowego poniżej wibroizolacji jest około 12-krotnie mniejsza co odpowiada praktyce w tego typu konstrukcjach.



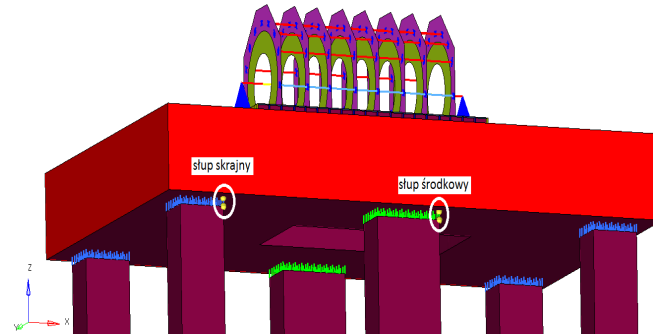
Rys.6. Przebieg przyspieszeń punktu pomiarowego poniżej wibroizolacji (słup) dla skrajnego słupa w kierunku X (strona lewa) oraz kierunku Z (strona prawa).



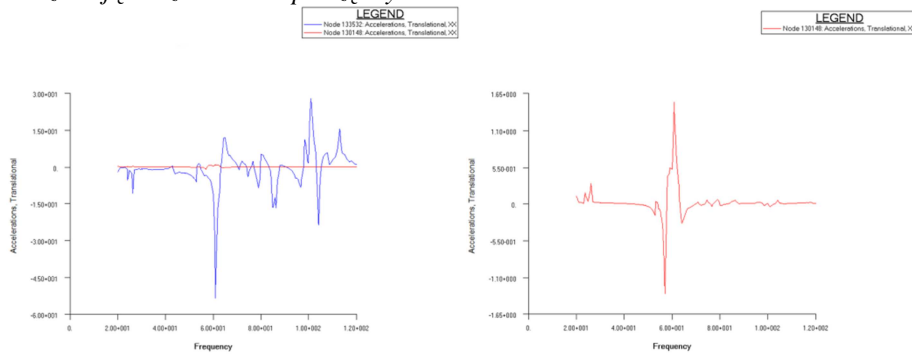
Rys.7. Przebieg przyspieszeń punktu pomiarowego powyżej wibroizolacji (fundament) dla skrajnego słupa w kierunku X (strona lewa) oraz kierunku Z (strona prawa).

6.2 Wyniki dla modelu z zastosowaną wibroizolacją

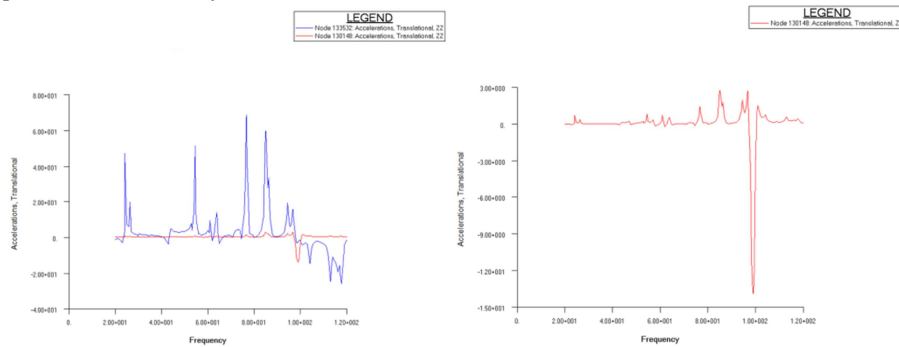
Analizy dynamiczne z uwzględnieniem wibroizolacji pokazały podobnie jak badania eksperymentalne znakomitą skuteczność takiego rozwiązania, które jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania maszyn obrotowych o znaczących masach. Podobnie jak badania eksperymentalne, dla słupów w kierunku Z, główna częstota własna to 100 Hz. Wszystkie wyniki są prezentowane w jednostce przyspieszenia [mm/s^2].



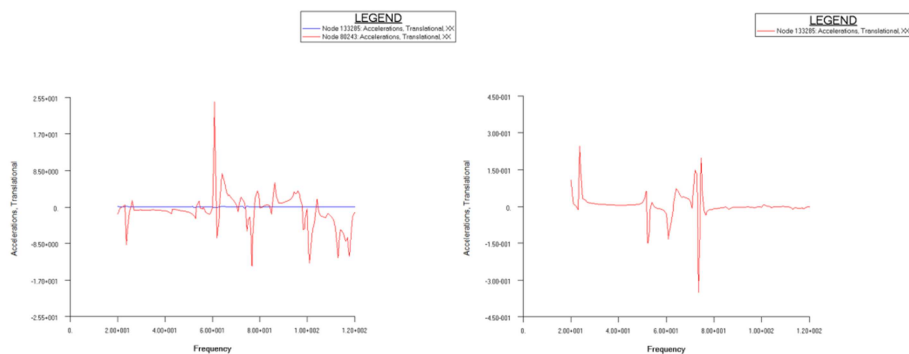
Rys.8. Widok punktów pomiarowych dla słupa skrajnego oraz środkowego przed- i za-wibroizolacją oraz układu współrzędnych.



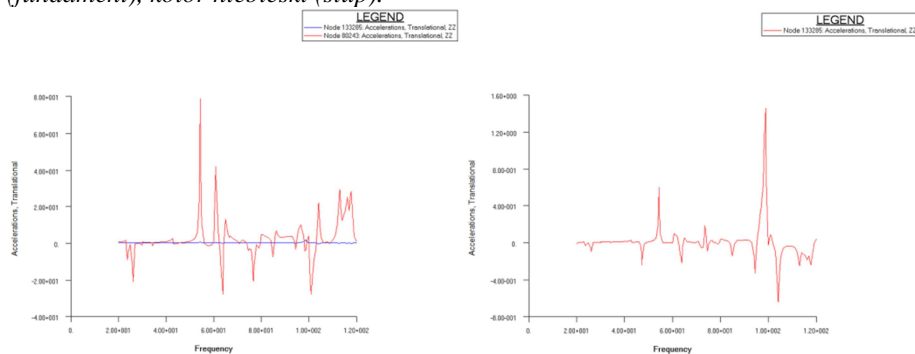
Rys.9. Przebieg przyspieszeń dla skrajnego słupa w kierunku X. Strona lewa – przebieg przed- i za- wibroizolacją. Strona prawa – przebieg za wibroizolacją. Kolor czerwony (słup), kolor niebieski (fundament).



Rys.10. Przebieg przyspieszeń dla skrajnego słupa w kierunku Z. Strona lewa – przebieg przed- i za- wibroizolacją. Strona prawa – przebieg za wibroizolacją. Kolor czerwony (słup), kolor niebieski (fundament).



Rys.11. Przebieg przyspieszeń dla skrajnego słupa w kierunku X. Strona lewa – przebieg przed- i za- wibroizolacją. Strona prawa – przebieg za wibroizolacją. Kolor czerwony (fundament), kolor niebieski (słup).

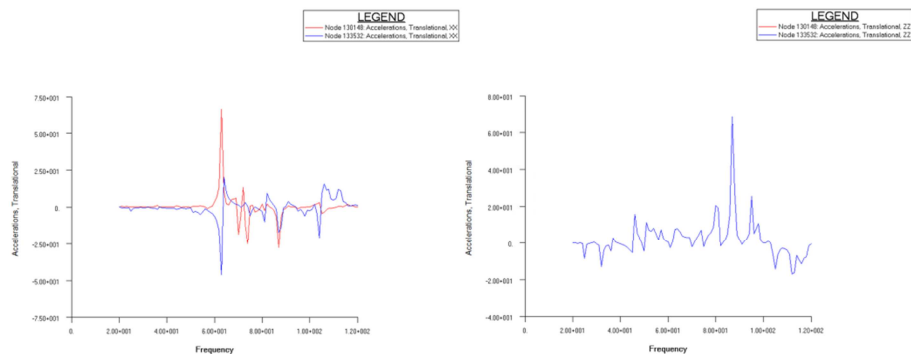


Rys.12. Przebieg przyspieszeń dla środkowego słupa w kierunku Z. Strona lewa – przebieg przed- i za- wibroizolacją. Strona prawa – przebieg za wibroizolacją. Kolor czerwony (fundament), kolor niebieski (słup).

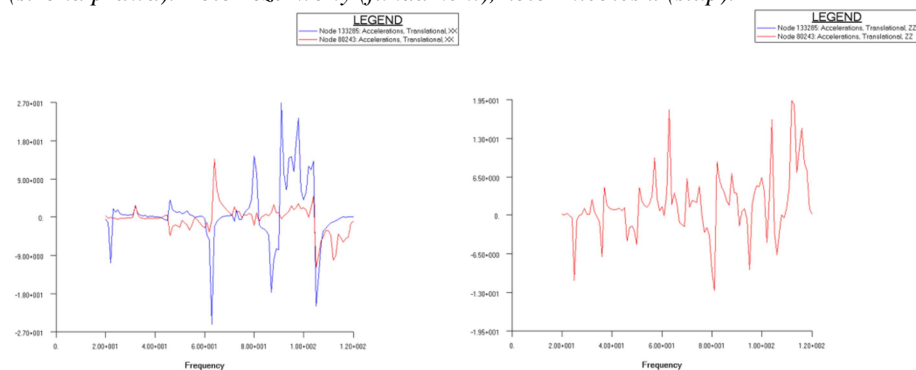
6.3 Wyniki dla modelu bez wibroizolacji

Brak stosowania wibroizolacji powoduje, że drgania w kierunku pionowym zarówno dla słupa jak i fundamentu są takie same ze względu na sztywne połączenie obu struktur. Różnica w kierunku poprzecznym wynika z numerycznego modelowania sztywnego połączenia za pomocą elementów typu RBE2.

Wszystkie wyniki są prezentowane w jednostce przyspieszenia [mm/s^2].



Rys.13. Przebieg przyspieszeń dla skrajnego słupa w kierunku X (strona lewa) i kierunku Z (strona prawa). Kolor czerwony (fundament), kolor niebieski (słup).



Rys.14. Przebieg przyspieszeń dla środkowego słupa w kierunku X (strona lewa) i kierunku Z (strona prawa). Kolor czerwony (fundament), kolor niebieski (słup).

7. WNIOSKI

Wykonane analizy pokazują ogromne możliwości zastosowania metody elementów skończonych w procesie projektowania obiektów wibroizolowanych. Ze względu na ogromne koszty takich obiektów jak i jednokrotność produkcji, wykorzystanie mes pozwala na dokładne zweryfikowanie całości konstrukcji nie tylko ze względu na zachowanie dynamiczne obiektu, ale i wytrzymałość strukturalną oraz odporność na wymuszenia typu trzęsienie ziemi. Kompleksowość takiego obiektu wymaga niestety bardzo dokładnego odtworzenia całości konstrukcji wraz z uwzględnieniem prawidłowych parametrów materiałowych czy chociażby tłumienia. Badania przedstawione w niniejszym artykule były oparte na ograniczonej liczbie danych przez co nie można oczekiwać dużej zgodności z pomiarami eksperymentalnymi. Szczególnie ważne jest uwzględnienie gruntu na którym posadzone są słupy. Niemniej idea działania wibroizolacji oraz jej wpływ na zachowanie się obiektu została prawidłowo odwzorowana. Przeprowadzone analizy mogą posłużyć do określenia m.in. trwałości zmęczeniowej przy wymuszeniach harmonicznym, badaniach rozprzestrzenianiu się drgań w gruncie od wszelkiego typu obiektów dynamicznych.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Goliński J.A.: *Wibroizolacja maszyn i urządzeń*, WNT warszawa 1979.
- [2] Norma PN-85/B-02170 pt: *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
- [3] Targosz J.: *Układy wibroizolacji w transporcie szynowym i samochodowym*, Uczelnianie Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2007.
- [4] Bowels, J.E., "Foundation Analysis and Design", 5th Edition, McGraw-Hill, 1996
- [5] ISO 1940-1 (1993) Mechanical Vibration – Balance Quality Requirements of Rigid Rotors – Part 1: Determination of Permissible Residual Unbalance
- [6] ISO 10816-1 (1995) Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts – Part 1: General Guidelines
- [7] ISO 10816-2 (2001) Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts – Part 2: Land-Based Steam Turbines and Generators in Excess of 50 MW
- [8] VDI 2056 (1964) Evaluation of Mechanical Vibration of Machines
- [9] DIN 4024 Part 1 (1988) Machine Foundations: Flexible Structures Supporting Machines with Rotating Masses
- [10] ACI 351.3R (2004) Foundations for Dynamic Equipment