



AXISVM

PRZEWODNIK DO ANALIZY DRGAŃ OD WYMUSZENIA RUCHEM PIESZYCH (ANG. FOOTFALL ANALYSIS)

Edited by: Inter-CAD Kft.

©2017 Inter-CAD Kft. All rights reserved

All brand and product names are trademarks or registered trademarks.

TA STRONA JEST CELOWO POZOSTAWIONA PUSTA

Spis treści

1.	WPROWADZENIE	1
2.	TŁO I TEORIA.....	2
2.1.	CHARAKTERYSTYKI DRGAŃ.....	2
2.2.	WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ODPOWIEDZI.....	3
2.2.1.	WPROWADZENIE DO PROCEDURY CCIP-016	3
2.2.2.	WPROWADZENIE DO PROCEDURY SCI P354	5
3.	IMPLEMENTACJA PROCEDUR W AXISVM X4	7
4.	PRZYKŁADY	9
4.1.	ANALIZA PŁASKIEJ PŁYTY O KSZTAŁCIE L	9
4.2.	ANALIZA WIELOKONDYGNACYJNEGO BUDYNKU	11
5.	GRANICZNE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ODPOWIEDZI	14
6.	BIBLIOGRAFIA	15

TA STRONA JEST CELOWO POZOSTAWIONA PUSTA

1. WPROWADZENIE

Celem analizy dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych (ang. *footfall analysis*) jest określenie i sprawdzenie przyspieszeń oraz drgań konstrukcji wywołanych przez człowieka. Drgania konstrukcji mogą powodować obniżenie komfortu, mogą wpływać na funkcjonowanie wrażliwych urządzeń, a nawet mogą ograniczać użyteczność obiektu.

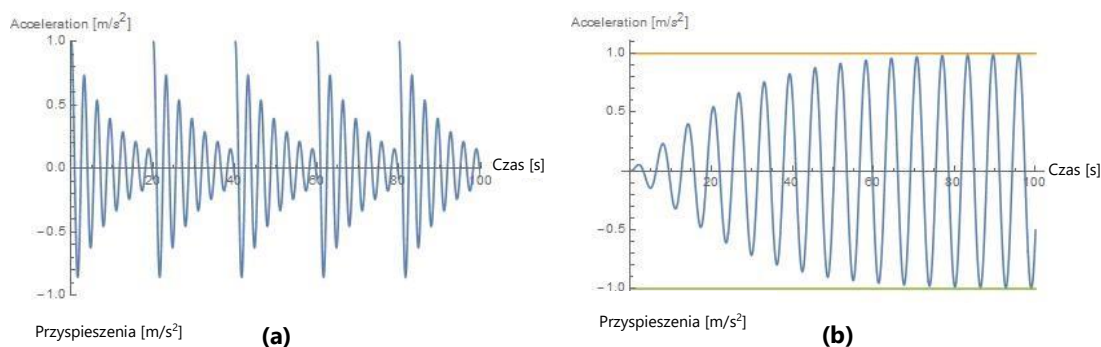
Podstawowym celem tego przewodnika jest przybliżenie wbudowanych procedur analizy footfall. Przedstawione tutaj podejście oparte jest na następujących pracach: „A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures”, [1] and "Design of Floors for Vibration: A New Approach", [2].

Podczas tworzenia modeli należy uwzględnić to, że konstrukcje obciążone dynamicznie są konstrukcjami sztywnymi. Ustawienie warunków brzegowych, połączeń między elementami konstrukcji oraz zwolnień węzłowych na końcach elementów musi wykazywać sztywniejsze charakterystyki w przypadku obciążeń dynamicznych niż miało by to miejsce w przypadku obciążeń statycznych.

2. TŁO I TEORIA

2.1. CHARAKTERYSTYKI DRGAŃ

Odpowiedź układu na drgania wymuszone może być przeprowadzona w oparciu o dwa typy analiz: **analiza nieustalona** (analiza czasowa, ang. *transient response*) i **analiza ustalona** (analiza rezonansowa). Poniżej scharakteryzowano dwa odrębne przypadki odpowiedzi układu konstrukcyjnego na dynamiczne wymuszenie ruchem pieszych (footfall). Pierwszy przypadek dotyczy konstrukcji „sztywnej”, która charakteryzuje się tym, że jej pierwsza wertykalna podstawowa częstotliwość drgań własnych jest czterokrotnie większa od podstawowej częstotliwości drgań wywołanych chodem pieszych. W takim przypadku nie zachodzi obawa drgań rezonansowych gdyż pomiędzy dwoma krokami vibracje zanikają ze względu na dużą sztywność i tłumienie konstrukcji. W takim przypadku wzbudzenie może być modelowane jako szereg uderzeń na konstrukcję, patrz Rys. 1(a). Należy w tym miejscu podkreślić, że pomija się superpozycję kolejnych dynamicznych wymuszeń ruchem pieszych. To założenie jest poprawne, jeżeli przyjmujemy rozkład drgań pomiędzy dwoma krokami. Drgania nieustalone są swobodną odpowiedzią dynamiczną układu oraz odpowiadają początkowym warunkom brzegowym tego układu. Zatem częstotliwość odpowiedzi odpowiada częstotliwościom własnym samego układu i tym samym częstotliwości od obciążeń wymuszonych nie pojawiają się w tym rozwiązaniu.



Rysunek 1. Możliwe charakterystyki reakcji przyspieszeń: serie nieustalonych drgań spowodowane uderzeniami w konstrukcję „sztywniejszą” (a), drgania ustalone wzbudzone ciągłą siłą działającą na „podatniejszą” konstrukcję (b).

Z drugiej strony, jeżeli konstrukcja jest „podatna”, istnieje częstotliwość drgań własnych która jest mniejsza od czterokrotnej podstawowej częstotliwości przy chodzeniu. W takim przypadku drgania rezonansowe mogą się pojawić jeżeli siła wzbudzająca nie będzie ortogonalna do postaci własnej. Rezonans pojawia się gdy częstotliwość podstawowa lub jedna z całkowitych wielokrotności częstotliwości podstawowej (ang. *overtones*) jest równa jednej z częstotliwości własnych konstrukcji. W takiej sytuacji rozwiązanie nieustalone jest nieistotne w przeciwieństwie do rozwiązania ustalonego. Amplituda przyspieszeń stabilizuje się po chwili, patrz Rys. 1(b). Należy w tym miejscu zauważyć, że do rozwoju amplitudy stanu ustalonego potrzebny jest czas, dlatego maksymalne przyspieszenie może rozwinąć się tylko w najniekorzystniejszej sytuacji tj. kiedy konstrukcja poddana jest działaniu długiemu w czasie wymuszeniu rezonansowemu.

2.2. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ODPOWIEDZI

2.2.1. WPROWADZENIE DO PROCEDURY CCIP-016

Organia
nieustalone

Funkcja wertykalnej prędkości wyznaczana jest z N_{tr} postaci własnych, gdzie r jest wskaźnikiem analizowanego węzła, a e jest wskaźnikiem węzła do którego przyłożono obciążenie:

$$v_{w,e,r,tr}(t) = \sum_{m=1}^{N_{tr}} \mu_{e,m} \mu_{r,m} \frac{I_{eff,m}}{m_m} \sin(2\pi f_m t) \exp(-2\pi \zeta f_m t), \text{ gdzie} \quad (1)$$

- N_{tr} : jest liczbą analizowanych postaci własnych,
- f_m : m-ta częstotliwość własna,
- ζ : krytyczny współczynnik tłumienia, patrz Tablica A2 w [1],
- $\mu_{e,m}$: pionowa składowa przemieszczenia węzła obciążonego (indeks: e), w m-tej modzie,
- $\mu_{r,m}$: pionowa składowa przemieszczenia analizowanego węzła (indeks: r), w m-tej modzie,
- $I_{eff,m}$: obciążenie impulsowe w analizie footfall, patrz równanie (4.10) w [1],
- m_m : masa modalna m-tej postaci własnej która równa jest 1, jeżeli kształt postaci jest znormalizowany względem masy,
- t : czas.

Prędkość uśrednioną można wyznaczyć z następującej zależności:

$$v_{w,rms,e,r,tr} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{w,e,r,tr}(t)^2 dt}, \text{ gdzie} \quad (2)$$

T : okres jednego kroku ($= \frac{1}{f_p}$). Ostatecznie współczynnik odpowiedzi przyjmuje postać (3):

$$R_{e,r,tr} = \begin{cases} \frac{v_{w,rms,e,r,tr}}{\frac{0.005 \frac{m}{s^2}}{2\pi f_1}}, & \text{dla } f_1 \leq 8\text{Hz} \\ \frac{v_{w,rms,e,r,tr}}{\frac{0.0001 \frac{m}{s}}{s}}, & \text{dla } f_1 > 8\text{Hz} \end{cases}, \text{ gdzie} \quad (3)$$

f_1 jest podstawową częstotliwością konstrukcji, która jest jedną z częstotliwości własnych (f_m) przy czym posiada największy współczynnik przy sumowaniu, patrz równanie (1). Równanie (3) uwzględnia wpływ wrażliwości na częstotliwość, który wyraża wrażliwość ludzkiego ciała poprzez zarówno częstotliwości sygnału odpowiedzi konstrukcji jak i wartości jej maksymalnego przyspieszenia.

Organia ustalone

Rzeczywista i urojona część przyspieszenia w odniesieniu do h-tej całkowitej wielokrotności częstotliwości podstawowej (ang. *overtone*) i m-tej postaci własnej:

$$a_{e,r,real,h,m} = \left(\frac{h \cdot f_p}{f_m} \right)^2 * \frac{F_h \mu_{e,m} \mu_{r,m} q}{m_m} * \frac{A_{h,m}}{A_{h,m}^2 + B_{h,m}^2}, \quad (4)$$

$$a_{e,r,imaginary,h,m} = \left(\frac{h \cdot f_p}{f_m} \right)^2 * \frac{F_h \mu_{e,m} \mu_{r,m} q}{m_m} * \frac{B_{h,m}}{A_{h,m}^2 + B_{h,m}^2}, \text{ gdzie}$$

- h : liczba harmonik (składowych harmonicznnych),
- f_m : m-ta częstotliwość własna,
- F_h : współczynnik Fouriera, który odnosi się do h-tej harmoniki,
- $\mu_{e,m}$: wertykalna składowa przemieszczenia obciążonego węzła (wskaźnik: e), dla m-tej postaci własnej,
- $\mu_{r,m}$: wertykalna składowa przemieszczenia analizowanego węzła (wskaźnik: r), dla m-tej postaci własnej,
- q : wskaźnik wzrostu rezonansu, $q = 1 - \exp(-2\pi \zeta N)$, gdzie N jest liczbą kroków,
- m_m : masa modalna m-tej postaci własnej która jest równa 1, jeżeli kształt postaci jest normalizowany względem masy,
- $A_{h,m} = 1 - \left(\frac{h \cdot f_p}{f_m} \right)^2$, $B_{h,m} = 2\zeta \frac{h \cdot f_p}{f_m}$: parametry.

Składowe przyspieszenia, które odnoszą się do h-tej harmoniki mogą być wyrażone

w następujący sposób:

$$a_{e,r,h} = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{N_{st}} a_{e,r,vals,h,m}\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{N_{st}} a_{e,r,képzetes,h,m}\right)^2}, \text{ gdzie} \quad (5)$$

N_{st} jest liczbą uwzględnionych postaci własnych. Współczynnik odpowiedzi h -tej harmoniki:

$$R_{e,r,st,h} = \begin{cases} \frac{\frac{a_{e,r,h}}{0.0141 \frac{m}{s^{2.5}}}}{\sqrt{h * f_p}}, & \text{jeżeli } h * f_p \leq 4Hz \\ \frac{\frac{a_{e,r,h}}{0.0071 \frac{m}{s^2}}}{\sqrt{h * f_p}}, & \text{jeżeli } 4Hz < h * f_p \leq 8Hz \\ \frac{\frac{a_{e,r,h}}{0.000282 \frac{m}{s} \pi h * f_p}}{\sqrt{h * f_p}}, & \text{jeżeli } h * f_p > 8Hz \end{cases} \quad (6)$$

Wyrażenie to zawiera wpływ wrażliwości na częstotliwość. Całkowity współczynnik odpowiedzi konstrukcji uwzględnia 4 harmoniki (składowe harmoniczne): $R_{e,r,st} = \sqrt{\sum_{h=1}^4 R_{e,r,st,h}^2}$ jest pierwiastkiem sumy kwadratów z czterech współczynników odpowiedzi dla składowych harmonicznych.

Współczynnik odpowiedzi analizowanego węzła, r wyznaczamy zgodnie z wyrażeniem (7) (e jest wskaźnikiem węzła obciążonego):

$$R_r = \max(\max_e R_{e,r,tr}, \max_e R_{e,r,st}). \quad (7)$$

Zgodnie z zapisem w wyrażeniu (7) maksymalizujemy odpowiedzi względem wskaźnika e , a ponadto obliczamy dwa maksima jedno dla drgań nieustalonych i jedno dla drgań ustalonych aby następnie przypisać większą wartość do węzła r .

2.2.2. WPROWADZENIE DO PROCEDURY SCI P354

Drgania
nieustalone

Wyrażenie (8) przedstawia funkcję wertykalnych przyspieszeń otrzymanych z N_{tr} postaci własnych, gdzie r jest wskaźnikiem analizowanego węzła, a e jest wskaźnikiem obciążonego węzła:

$$a_{w,e,r,tr}(t) = \sum_{n=1}^{N_{tr}} 2\pi f_n \sqrt{1-\zeta^2} \mu_{e,n} \mu_{r,n} \frac{F_I}{M_n} \sin(2\pi f_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \exp(-\zeta 2\pi f_n t) W_n, \text{ gdzie} \quad (8)$$

- N_{tr} : jest analizowaną liczbą postaci własnych,
- f_n : n -ta częstotliwość własna,
- ζ : krytyczny współczynnik tłumienia, patrz Tablica 4.1 w [2],
- $\mu_{e,n}$: wertykalna składowa przemieszczenia obciążonego węzła (wskaźnik: e), dla n -tej mody,
- $\mu_{r,n}$: wertykalna składowa przemieszczenia analizowanego węzła (wskaźnik: r), dla n -tej mody,
- F_I : obciążenie impulsowe w analizie footfall,
- M_n : masa modalna n -tej postaci własnej która jest równa 1, jeżeli kształt postaci jest normalizowany względem masy,
- t : czas,
- W_n : funkcja wagowa zależna od częstotliwości związanej z n -tą modą, patrz [2].

Uśrednione przyspieszenie uzyskane z przyspieszenia zależnego od czasu, patrz równanie (8):

$$a_{w,rms,e,r,tr} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{w,e,r,tr}(t)^2 dt}, \text{ gdzie} \quad (9)$$

T : okres jednego kroku $\left(= \frac{1}{f_p}\right)$

Drgania ustalone

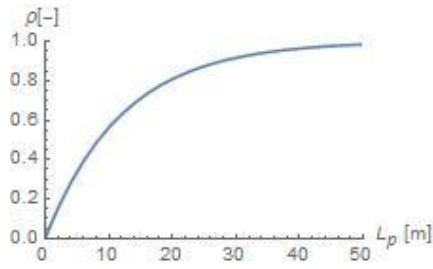
Funkcja przyspieszenia z H harmonik (składowych harmonicznym) i N_{st} postaci własnych:

$$a_{w,e,r,st}(t) = \sum_{n=1}^{N_{st}} \sum_{h=1}^H \mu_{e,n} \mu_{r,n} \frac{F_h}{M_n} D_{n,h} \sin(2\pi h f_p t + \phi_h + \phi_{n,h}) W_h, \text{ gdzie} \quad (10)$$

- N_{st} : jest analizowaną liczbą postaci własnych,
- f_p : ścieżka, podstawowa częstotliwość ruchu pieszego,
- $\mu_{e,n}$: wertykalna składowa przemieszczenia obciążonego węzła (wskaźnik: e), dla n -tej mody,
- $\mu_{r,n}$: wertykalna składowa przemieszczenia analizowanego węzła (wskaźnik: r), dla n -tej mody,
- F_h : współczynnik Fouriera, który zależy od h -tej harmoniki (składowej harmonicznej), patrz [2],
- M_n : masa modalna n -tej postaci własnej która jest równa 1, jeżeli kształt postaci jest znormalizowany względem masy,
- t : czas,
- $D_{n,h}$: współczynnik odpowiedzi (n -tej postaci, h -tej harmoniki), patrz [2],
- $\phi_n, \phi_{n,h}$: kąty fazowe (n -tej postaci, h -tej harmoniki), patrz [2],
- W_n : funkcja wagowa zależna od częstotliwości związanej z n -tą modą, patrz [2].

Analiza drgań ustalonych (obie procedury) uwzględnia tylko te postacie własne, które charakteryzują się częstotliwością własną mniejszą od częstotliwości podstawowej pomnożonej przez liczbę harmonik (H)+2Hz (limit odcięcia). Przyrost przyspieszenia ponad limit odcięcia jest pomijalny. W pierwszej kolejności sumowane są składowe przyspieszenia względem harmonik (składowych harmonicznym). Następnie amplituda przyspieszenia wyznaczana jest przez sumowanie (SRSS) względem postaci własnych. Na podstawie tego można uzyskać pionowe przyspieszenia węzła r , kiedy węzeł e jest wzbudzany, patrz równanie (11).

$$a_{w,rms,e,r,st} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\sum_{h=1}^H \mu_{e,n} \mu_{r,n} \frac{F_h}{M_n} D_{n,h} W_h \right)^2}. \quad (11)$$



Rysunek 2. Współczynnik wzrostu rezonansu jako funkcja długości ścieżki spacerowej, $\zeta = 1\%$, $f_p = 2\text{Hz}$.

W przypadku drgań rezonansowych czas jest niezbędny do osiągnięcia maksymalnej wartości przyspieszenia, patrz Rys. 1(b). Dlatego rozwiązania stanu ustalonego mogą być zmniejszone:

$$a_{w,rms,e,r,st} = a_{w,rms,e,r,st} * q, \text{ gdzie} \quad (12)$$

q współczynnik wzrostu rezonansu: $q = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi\zeta L_p f_p}{v}\right)$, gdzie

- L_p : długość ścieżki spacerowej: (długość najdłuższego korytarza lub, większy z poziomych wymiarów analizowanego budynku).
- v : prędkość chodzenia, patrz równanie (16) w [2].

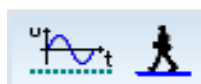
Zgodnie z tym, odpowiedź przyspieszenia w odniesieniu do analizowanego węzła r przyjmuje postać (13):

$$a_{w,rms,r} = \max(\max_e a_{w,rms,e,r,tr}, \max_e a_{w,rms,e,r,st}), \quad (13)$$

co daje bezwymiarowy współczynnik odpowiedzi analizowanego węzła r :

$$R_r = \frac{a_{w,rms,r}}{0.005 \frac{m}{s^2}}. \quad (14)$$

3. IMPLEMENTACJA PROCEDUR W AXISVM X4



Rysunek 3. Aktywna analiza dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych (footfall)

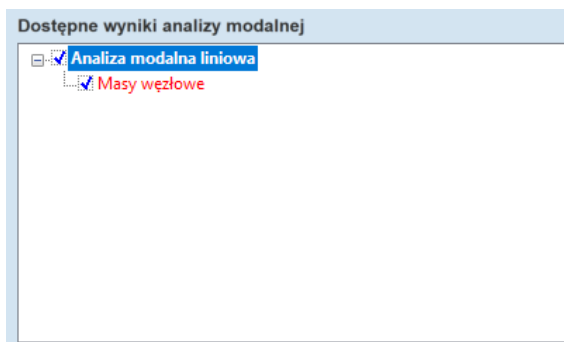
Analiza dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych (footfall) jest aktywna jeżeli wyniki drgań odnoszą się do analizowanego modelu, patrz Rys. 3. Na Rysunku 4 przedstawiono okienko analizy dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych (analiza footfall). Procedura zostanie aktywowana po kliknięciu przycisku „Ok” jeżeli, model będzie zawierał elementy powierzchniowe wśród których znajdzie się przynajmniej jeden element o kącie nachylenia jego normalnej do kierunku grawitacji mniejszym niż 70° . Procedura traktuje elementy powierzchniowe jako stopy jeżeli kąt pomiędzy normalną elementu powierzchniowego i kierunkiem grawitacji jest mniejszy równy 10° . W przypadku gdy kąt ten znajduje się w przedziale $10^\circ - 70^\circ$ elementy powierzchniowe traktowane są jako schody. Wtedy, inne graniczne częstotliwości i współczynniki Fouriera są przypisywane do tych elementów (tylko SCI P354 procedura). W węzłach, które odnoszą się do ścian lub prętów program nie przykłada wymuszenia i nie analizuje przyspieszeń tych węzłów.

Rysunek 4. Okno określania współczynnika odpowiedzi na drgania.

Procedura określenia współczynnika odpowiedzi na drgania jest bardzo czasochłonna dlatego program oferuje pewne uproszczenia, które są w stanie w znaczący sposób skrócić czas analizy.

Postacie własne do uwzględnienia

- **Wszystkie postacie modalne dla danego przypadku/kombinacji:** jeżeli użytkownik aktywuje ten przycisk wyboru wtedy, wszystkie postacie własne, związane z przypadkami obciążenia lub kombinacji obciążeń, będą brane pod uwagę. Dlatego, liczba mód własnych w analizie drgań nieustalonych N_{tr} , jest równa liczbie mód, które odpowiadają przypadkom obciążenia/kombinacji. Z kolei w przypadku analizy drgań ustalonych wszystkie mody własne spełniające limit odcięcia są uwzględniane (N_{st}), gdzie limit odcięcia równy jest podstawowej częstotliwości pomnożonej przez liczbę harmonik (H)+2Hz. Z punktu widzenia możliwości wystąpienia rezonansu postacie własne powyżej ustalonego limitu są nieistotne.
- **Postacie aktywowane w tabeli „Modalne współczynniki udziału”:** użytkownik może wyłączyć mody, co prawdopodobnie nie będzie miało wpływu na wyniki analizy dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych.
- **Poniżej granicznej częstotliwości:** tym ustawieniem użytkownik może zdefiniować odcinającą częstotliwość powyżej której program nie będzie brał pod uwagę postaci własnych.

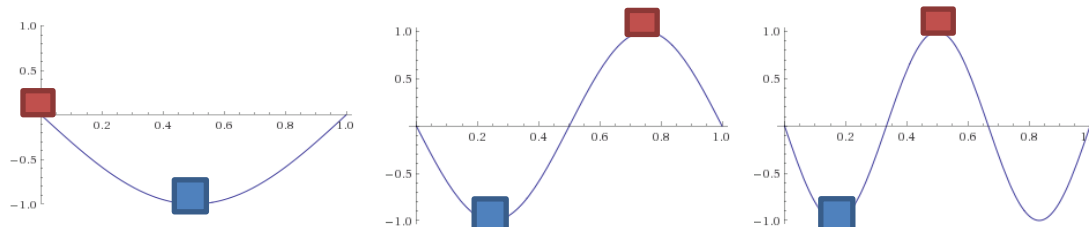


Nazwa przypadku obciążenia lub kombinacji zostanie wyróżniona na czerwono (patrz Rys. 5) jeżeli, prawdziwa będzie przynajmniej jedna z trzech wymienionych poniżej sytuacji. Sytuacja 1 – największa wyznaczona częstotliwość własna jest poniżej kryterium odcięcia. Sytuacja 2 – użytkownik wyłączy postacie własne poniżej limitu odcięcia. Sytuacja 3 – limit częstotliwości jest poniżej limitu odcięcia.

Rysunek 5. Ostrzeżenie dla wyniku analizy modalnej

Metoda
wzbudzania

- **Pelne (każdy węzeł do każdego węzła):** w tej opcji analizowany węzeł stropu lub schodów jest wzbudzony przez arbitralnie wybrane węzły, które odnoszą się do stropu lub schodów (oprogramowanie nie analizuje ani nie obciąża węzłów które należą do ścian).
- **Wzbudzenie w ekstremach postaci:** w tym przypadku wzbudzane węzły (e) są ograniczone w ten sposób, że tylko w dwóch ekstremach (min i max) postaci mód są wzbudzenia, patrz Rys. 6:



Rysunek 6. Wzbudzenia w ekstremach postaci modalnych, wzbudzone węzły.

- **Wzbudzenie w węźle gdzie analizowana jest odpowiedź:** przy tej opcji wymuszany i analizowany węzeł jest tym samym węzłem, więc $e = r$. Ten przypadek jest prawidłowy jeżeli użytkownik jest zainteresowany globalnym maksimum widma odpowiedzi drgań a celem analizy jest wykazanie, że konstrukcja w ujęciu globalnym jest niezawodna. Niemniej jednak, sugeruje się sprawdzić wynik metodą opisaną powyżej.
- **Wzbudzanie tylko do sąsiednich kondygnacji:** opcja jest aktywna jeżeli model składa się z przynajmniej trzech kondygnacji. Jeżeli użytkownik włączy tę opcję, wtedy kondygnacja analizowanego węzła i kondygnacja wzbudzonego węzła musi być tą samą kondygnacją lub muszą to być kondygnacje przyległe. Inny wariant obciążenia będzie niemożliwy.

Współczynnik
tłumienia

Współczynnik tłumienia może być wybrany zgodnie z pracami [1] i [2]. Opis analizy dynamicznym wymuszeniem ruchem pieszych znajduje się powyżej.

Częstotliwość
kroku

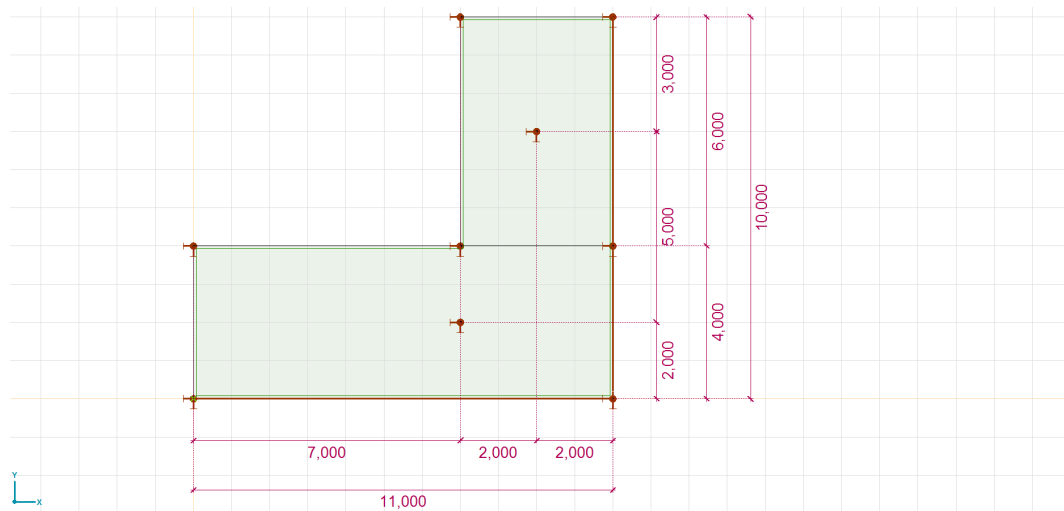
Podczas ustalania częstotliwości kroku użytkownik określa dolną i górną granicę analizowanego zakresu częstotliwości. W trakcie analizy program ocenia listę w której pojawiają się dyskretne wartości częstotliwości, które powodują rezonans układu. Jeżeli otrzymane częstotliwości są mniejsze niż 20, wtedy interwał (przedział) dzielony jest na połowę a do listy dodawane są kolejne elementy. Jeżeli otrzymane częstotliwości są większe niż 20 wtedy takie elementy są usuwane z listy. Jeżeli największa różnica pomiędzy dwoma dyskretnymi wartościami częstotliwości jest większa niż 0.1 Hz, wtedy przedziały również są dzielone na połowę. Ostatecznie obliczenia przeprowadzane są dla 20 dyskretnych wartości częstotliwości kroku.

4. PRZYKŁADY

4.1. ANALIZA PŁASKIEJ PŁYTY O Kształcie L

Parametry

Parametry geometryczne analizowanej konstrukcji przedstawiono na Rys. 7. Grubość płyty jest stała i wynosi: **20 cm**.

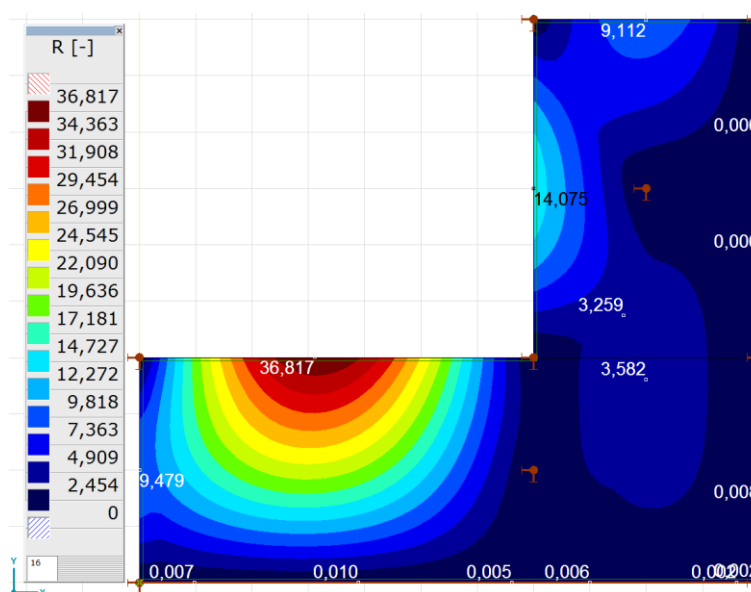


Rysunek 7. Wymiary analizowanej konstrukcji.

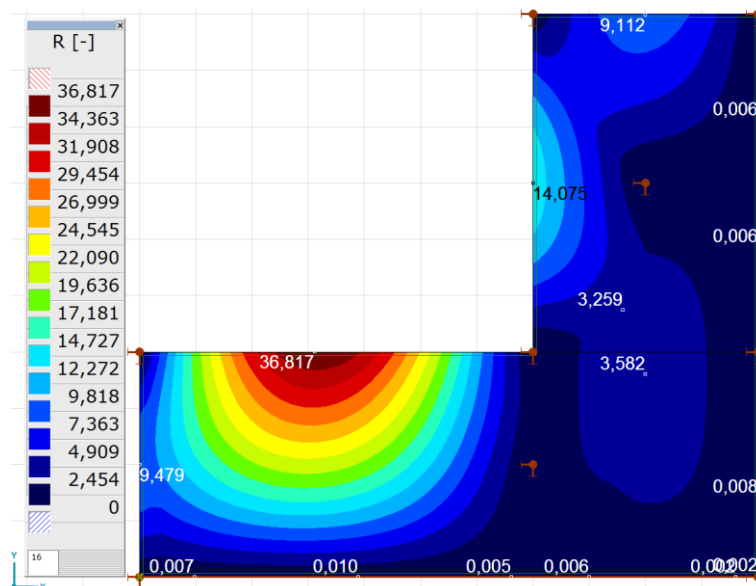
Analizowana płyta wykonana jest z betonu klasy C25/30 (wg EC2). Moduł Younga wynosi więc: $E = 3150 \text{ kN/cm}^2$. Przyjęto punktowe podparcia przegubowe, patrz Rys. 7. Liczba węzłów: 1870, analizowana liczba mód: 10.

Wyniki

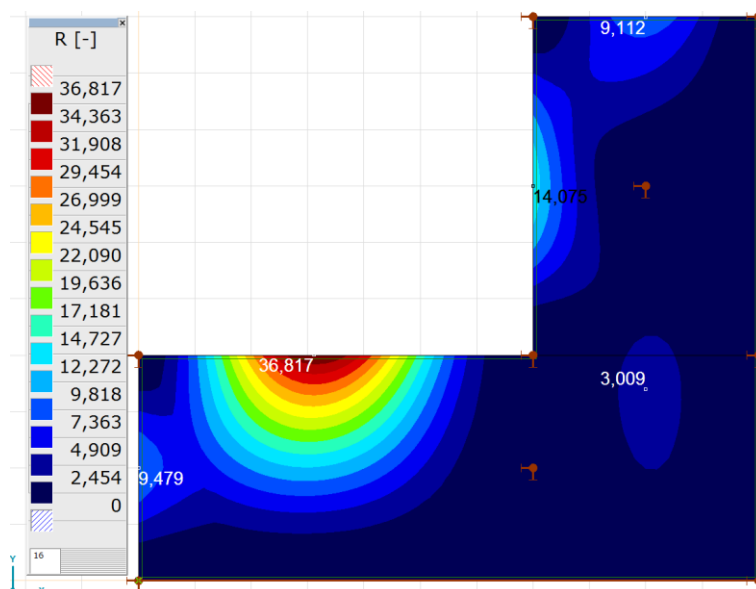
Wyniki rozwiązane tego samego zadania, lecz przy zastosowaniu różnych metod wzbudzenia przedstawiono na Rys. 8, Rys. 9 i Rys. 10. Można zauważyć, że maksymalne wartości są takie same, lecz obwiednie funkcji postaci różnią się od siebie. Należy zauważyć, że metoda pełnego wzbudzenia daje największe przyspieszenia.



Rysunek 8. Pełne wzbudzenie, metoda CCIP-016, czas analizy: 20 sec.



Rysunek 9. Wzbudzenie w ekstremach postaci modalnych, metoda CCIP-016, czas analizy: 2 sec.

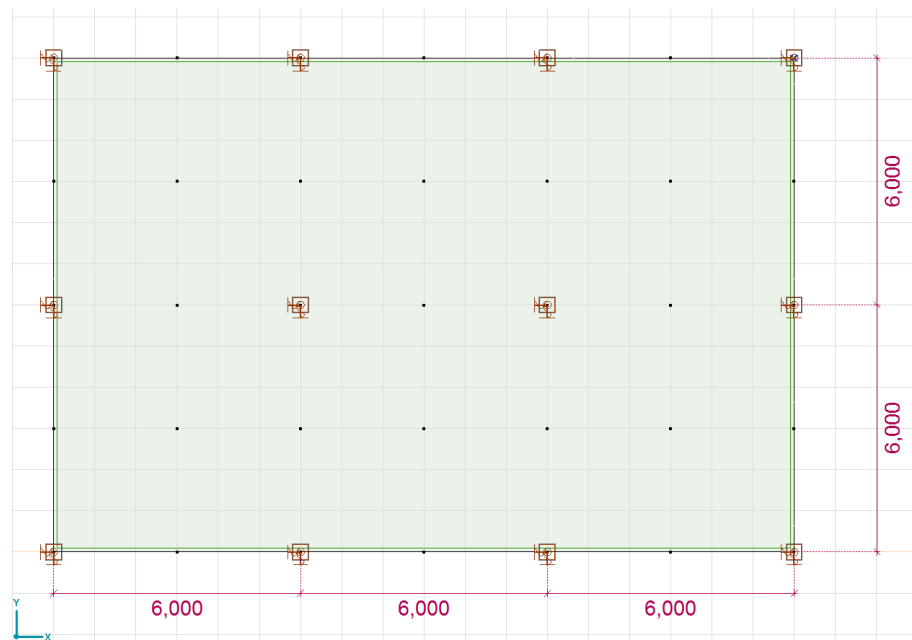


Rysunek 10. Wzbudzenie w węzłach gdzie analizowana jest odpowiedź dynamiczna, metoda CCIP-016, czas analizy: <1 sec.

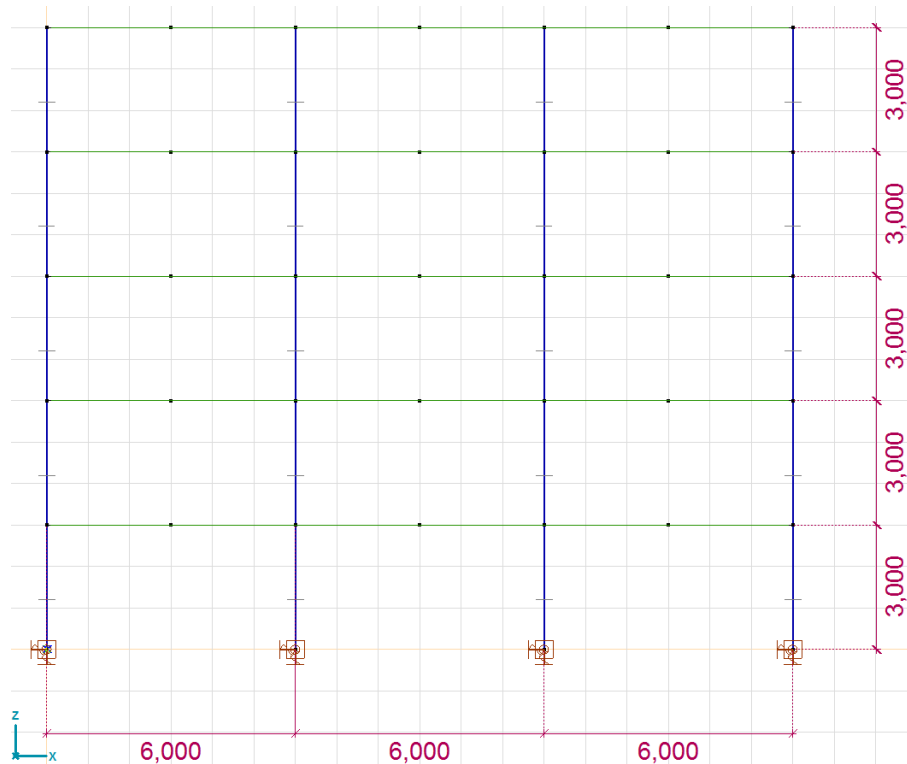
4.2. ANALIZA WIELOKONDYGNACYJNEGO BUDYNKU

Parametry

Geometryczne parametry konstrukcji przedstawiono na Rys. 11 i Rys. 12. Grubość płyty jest stała i wynosi: **20cm**. Słupy są zaprojektowane z przekroju prostokątnego o wymiarach: **40x40 cm**.



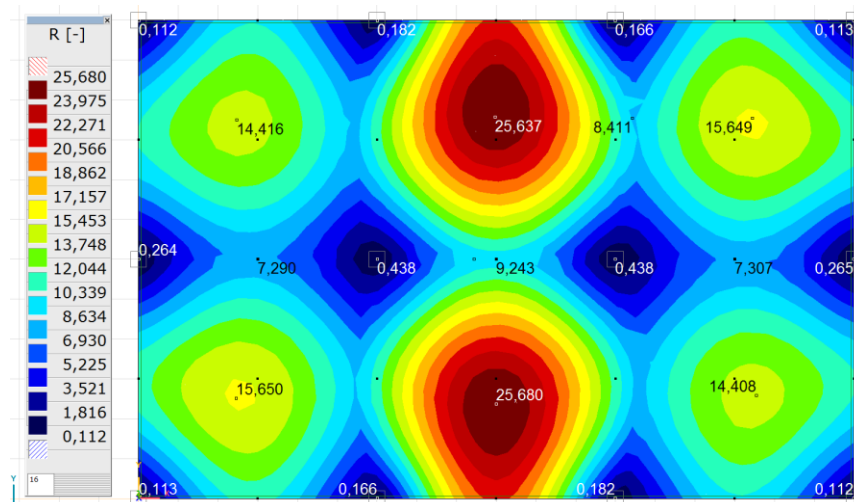
Rysunek 11. Wielokondygnacyjny budynek, rzut kondygnacji.



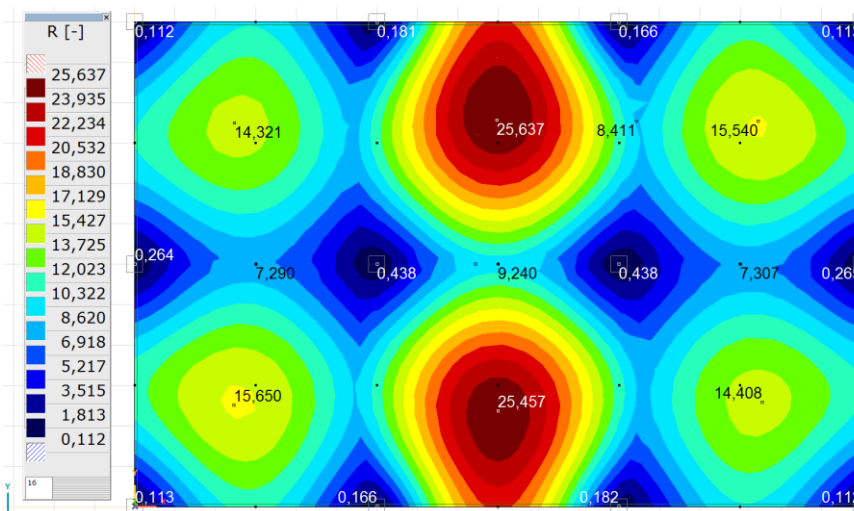
Rysunek 12. Wielokondygnacyjny budynek, przekrój.

Konstrukcja wykonana jest z betonu klasy C16/20 (wg EC2), moduł Younga wynosi: $E = 2860 \text{ kN/cm}^2$. Słupy są zamocowane. Liczba węzłów wynosi: 6647, liczba analizowanych postaci po kierunku z: 50.

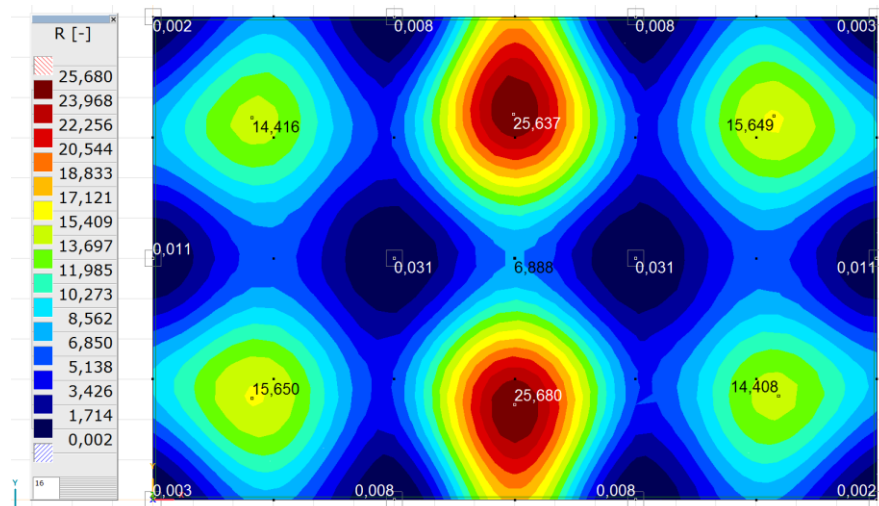
Wyniki analizy, tj. współczynniki odpowiedzi drgań pierwszej kondygnacji, otrzymane różnymi metodami wzbudzenia przedstawiono na Rys. 13, Rys. 14 i Rys. 15. Na Rysunku 13 przedstawiono rozwiązania „dokładne” tj. przypadek pełnego wzbudzenia. Na Rysunku 14 przedstawiono wyniki dla metody wzbudzenia w punktach ekstremalnych postaci modalnych. Na Rysunku 15 zaprezentowano wyniki dla metody wzbudzenia opierającej się na wzbudzaniu węzłów, których odpowiedź jest analizowana. Należy zauważyć, że wszystkie trzy metody podają podobne wartości maksymalne, lecz obwiednie funkcji odpowiedzi są różne. Jeśli wykorzystamy metodę wzbudzania tylko sąsiadujących ze sobą kondygnacji, wtedy czas analizy możemy zredukować do 1087 s.



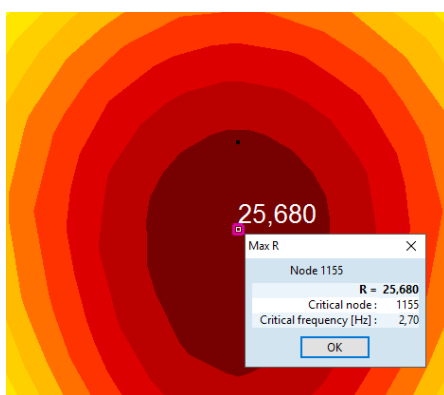
Rysunek 13. Strop pierwszej kondygnacji, pełne wzbudzenie, metoda CCIP-016, bez analizowania węzłów kondygnacji, czas analizy: 1335 sec.



Rysunek 14. Strop pierwszej kondygnacji, wymuszenie w ekstremach postaci modalnych, metoda CCIP-016, bez analizowania węzłów kondygnacji, czas analizy: 57 sec.



Rysunek 15. Strop pierwszej kondygnacji, wymuszenie w węzłach w których mierzona jest odpowiedź, metoda CCIP-016, bez analizowania węzłów kondygnacji, czas analizy: 2 sec.

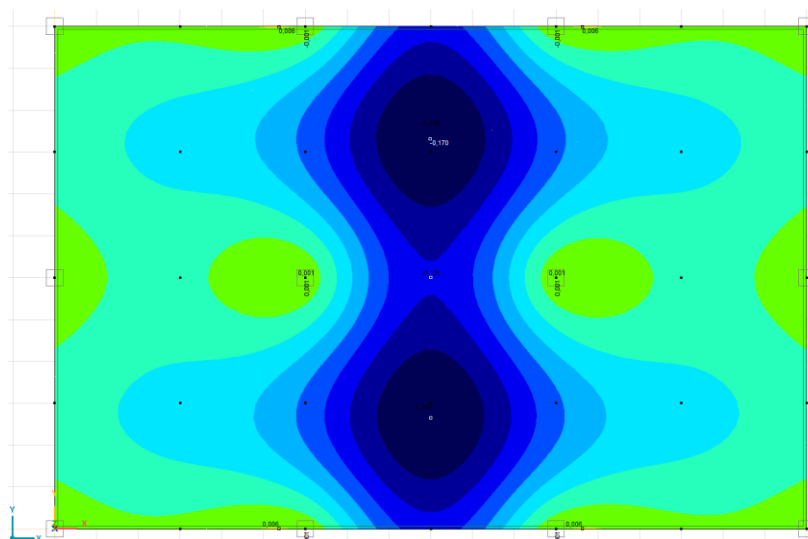


Rysunek 16. Wynik: maksymalna wartość funkcji.

Analiza wartości maksymalnej współczynnika odpowiedzi:

- numer węzła w którym podana jest wartość maksymalna,
- maksymalna wartość,
- węzeł wzbudzony, który odpowiada najbardziej niekorzystnemu przypadkowi
- krytyczna częstotliwość.

W analizowanym przypadku krytyczna częstotliwość podstawowa wynosi $f = 2.70$ Hz. W wyniku analizy postaci własnych oraz częstotliwości własnych wykazano, że 30 postać własna charakteryzuje się częstotliwością $f_{0,30} = 10.80$ Hz. Ta postać własna przedstawiona jest na Rys. 17. Proszę zauważyć, że taka postać rezonuje przy trzykrotności wartości częstotliwości rezonansowej gdyż jest równa czterokrotności częstotliwości podstawowej.



Rysunek 17. 30 postać własna ($f_{0,30} = 10.80$ Hz), składowa z przemieszczenia pierwszej kondygnacji.

5. GRANICZNE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ODPOWIEDZI

Wartości graniczne współczynników odpowiedzi drgań wg różnych norm zestawiono w Tablicy 1 i 2.

Graniczne
wartości wg
BS 6472, [3]:

Miejsce	Czas	Ciągłe drgania 16h w dzień 8h w nocy	Impulsowe wymuszenie z maksymalnie 3 zdarzeniami
Istotne miejsca pracy (np.: szpitale operacyjne)	Dzień	1	1
	Noc	1	1
Mieszkanie	Dzień	2 do 4	60 do 90
	Noc	1.4	20
Biuro	Dzień	4	128
	Noc	4	128
Warsztat	Dzień	8	128
	Noc	8	128

Tablica 1. Wartości graniczne współczynników odpowiedzi drgań wg **BS 6472**, [3].

Graniczne
wartości wg
SCI, [4]:

Miejsce	Ciągłe drgania
Biuro	8
Centrum handlowe	4 [4]
Sala operacyjna	4
Schody – lekkiego przeznaczenia (biura)	32 [5]
Schody – ciężkiego przeznaczenia (np. budynki użyteczności publicznej, stadiony)	24 [5]

Tablica 2. Wartości graniczne współczynników odpowiedzi drgań wg, **SCI**, [4].

6. BIBLIOGRAFIA

1. Willford, M.R., Young, P. *A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures*, Concrete Society, 2006
2. Smith, A. L., Hicks, S. J., Devine, P. J. *Design of Floors for Vibration: A New Approach*, The Steel Construction Institute, Ascot, 2009
3. BS 6472:1992 *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*
4. Wyatt, T. A. *Design guide on the vibration of floors*, The Steel Construction Institute, 1989
5. Ellingwood, B. *Structural serviceability: Floor vibrations*, ASCE Journal of Structural Engineering, 1984
6. Bishop, N. W. M., Willford, M., Pumphrey, R. *Human induced loading for flexible staircases*, Safety Science 18, 1995