

Krzysztof KOZIOL<sup>1</sup>

## POMIARY IN-SITU JAKO SPOSÓB NA PROGNOZĘ OBCIĄŻENIA DYNAMICZNEGO BUDYNKÓW

Budując obiekty inżynierskie w strefie oddziaływań dynamicznych powinniśmy zabezpieczyć jego konstrukcję jak i ludzi w nim przebywających przed niepożądanymi wpływami drgań. Jednym z problemów w takich sytuacjach jest właściwy dobór obciążenia projektowanego budynku. W opracowaniu zaproponowano sposób doboru wymuszenia przy wykorzystaniu badań terenowych polegających na pomiarze wymuszenia na gruncie w miejscu lokalizacji przyszłego obiektu. Ze względu, na falowy charakter propagacji drgań na granicy ośrodków grunt - budynek mamy do czynienia z jej załamaniem się i odbiciem. Problem ten jest złożony, bowiem generowane przez „wymuszenie” drgania mają różnorodną strukturę amplitudowo-częstotliwościową. Tym nie mniej charakter rozkładu amplitudowo-częstotliwościowego niejednokrotnie jest cechą określającą rodzaj wymuszenia (tramwaju, pociągu metra, odstrzału –ilości i rodzaju ładunku,...). W opracowaniu przedstawiono przykład funkcji przejścia jaka należałoby zastosować na zmierzone drgania gruntu w celu określenia przyspieszenia fundamentów budynku. Funkcja ta opracowana została na podstawie analizy drgań spowodowanych przejazdem tramwajów dla obiektu o określonych charakterystykach dynamicznych. Dlatego projektowany budynek powinien mieć podobne do niego cechy dynamiczne.

**Słowa kluczowe:** wpływ na ludzi, wpływ na budynki, dynamika, pomiary drgań

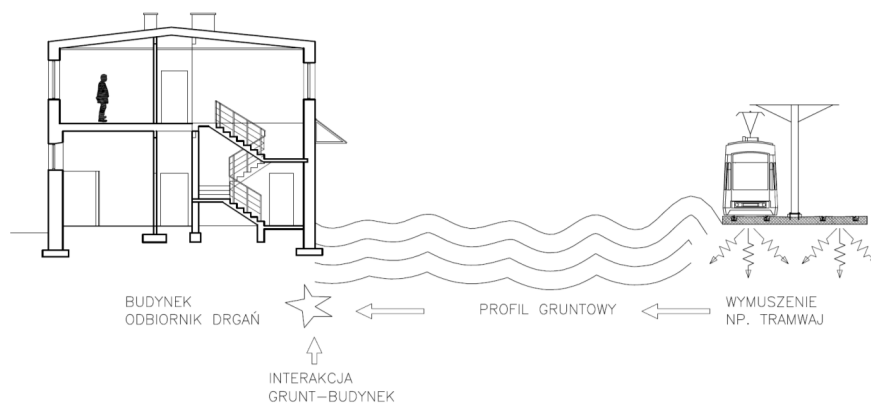
### 1. Wprowadzenie

Każdy obiekt inżynierski narażony jest na różnorodne działania mające charakter „statyczny” lub dynamiczny. Obciążenia o charakterze statycznym w przeciwieństwie do działań dynamicznych są dość dobrze rozeznane, opisane i unormowane. Dla przypadku wymuszeń dynamicznych w szczególności tych dla których wymuszenie w sposób bezpośredni nie jest związane z obiektem należy rozpatrzyć drogę dojścia do niego obciążenia (rys. 1).

Poruszający się tramwaj poprzez układ warstw podtorza przekazuje energię na grunt z którego propaguje się ona w ośrodku gruntowym do osadzonego w nim budynku powodując ruch fundamentów a następnie całego obiektu.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, 12-628-23-91, koziol\_k@poczta.fm



Rys. 1. Droga propagacji drgań

Fig. 1. Way of vibrations propagation

Należy zauważyć, że ruch fundamentu i gruntu znajdującego się w jego bezpośrednim sąsiedztwie nie są takie same, a niejednokrotnie bardzo się od siebie różnią. Związane jest to zagadnieniem przejścia fali przez różne ośrodki.

W opracowaniu przedstawiam zależności pomiędzy przyśpieszeniem zarejestrowanym na gruncie i w sztywnym węźle konstrukcji na poziomie jej posadowienia rys. 2.



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych przy budynku

Fig. 2. Location of measurement points to the building

Analizie poddano 4 budynki dwukondygnacyjne z lokalami usługowymi na parterze i mieszkalnymi na poddaszu. Obiekty te wykonane zostały w technologii tradycyjnej – ściany murowane, stropy żelbetowe, dach o konstrukcji dREW-

nianej. Budynki te zlokalizowane są w odległościach od 8 do 13 m od źródła drgań jakim jest tramwaj.

W celu uniknięcia interakcji pomiędzy falą odbitą od budynku a falą w gruncie spowodowaną wymuszeniem od tramwaju zdecydowano się na przesunięcie czujnika zlokalizowanego na gruncie w stosunku do budynku. Wielkość przesunięcia od obiektu (na rys.2 wymiar DB) czujników pomiarowych wynosi 6,0m. Wielkościami pomiarowymi w przypadku budynków jak i gruntu były przyspieszenia. Jednostką wykonująca pomiary było akredytowane Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli Politechniki Krakowskiej. Badania wykonano zgodnie z następującą procedurą:

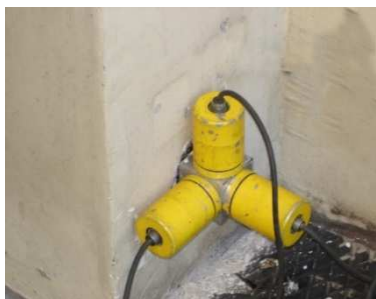
- kalibracja czujników,
- montaż czujników na budynku (rys.3,4),
- montaż toru pomiarowego na stanowisku,
- sprawdzenie toru pomiarowego,
- próbny pomiar w celu ustalenia nastaw aparatury,
- przeprowadzenie pomiaru – rejestracja przy pomocy analizatora LMS Scadas Mobile w wersji 16-kanałowej w punktach pomiarowych drgań wywołanych przez poszczególne zdarzenia (przejazdy tramwajów oraz różnych pojazdów samochodowych) wraz z odnotowaniem każdego zdarzenia w protokole pomiarowym,
- kalibracja sprawdzająca po zakończeniu pomiaru,
- demontaż toru pomiarowego (po zakończeniu rejestracji).

Pomiary drgań dokonano jednocześnie we wszystkich punktach pomiarowych przynależnych do wybranego budynku.

Montaż czujników w przypadku budynku (rys.3) dokonano za pomocą kostki przyklejonej w sposób sztywny do narożnika budynku gdzie zbiegają się dwie wzajemnie prostopadłe do siebie ściany - pozwoliło to na zniwelowanie wpływu odkształcenia elementu konstrukcji.

W przypadku czujników zlokalizowanych na gruncie zastosowano specjalną (rys.4) konstrukcję w postaci krzyża przymocowaną do gruntu za pomocą czterech kotew gruntowych (pręty fi 16 długości 25 cm). Jako czujników pomiarowych użyto akcelerometrów typu PCB 393B12 firmy PCB Piezotronics o czułości 10 V/g, zaś rejestracji dokonano przy pomocy analizatora LMS Scadas Mobile

Uzyskane w wyniku rejestracji 112 przebiegów czasowe przyspieszeń drgań gruntu i fundamentu budynku spowodowane przejazdem tramwajów poddano analizom numerycznym polegającym na analizie trójowej wartości maksymalnej amplitud w pasmach 1/3 oktaawowych i określenia ilościowej i jakościowej zmiany struktury sygnału po przejściu między fazami.



Rys. 3. Sposób mocowania czujników do konstrukcji

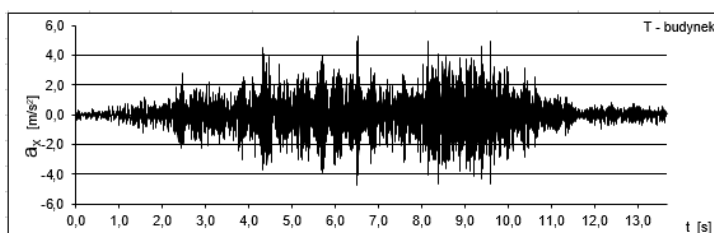
Fig. 3. The method of attaching sensors to the structure (cube)



Rys. 4. Sposób mocowania czujników na gruncie

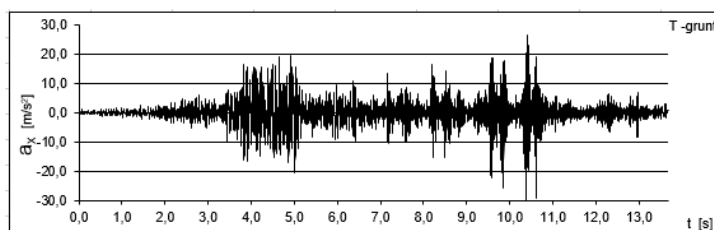
Fig. 4. The method of attaching sensors onto ground (cross)

Przykładowe zmiany amplitudy przemieszczeń gruntu i budynku w kierunku poziomym związanych z przejazdem tramwaju pokazano na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Przyspieszenie poziome gruntu przy budynku przejazdu tramwaju E1-C3

Fig. 5. Horizontal ground acceleration at the building B2 for the tram E-C3 ride



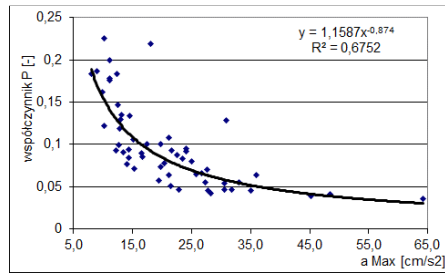
Rys. 6. Przyspieszenie poziome fundamentu budynku przejazdu tramwaju E1-C3

Fig. 6. Horizontal acceleration at the building for the tram E-C3 ride

## 2. Analiza wyników

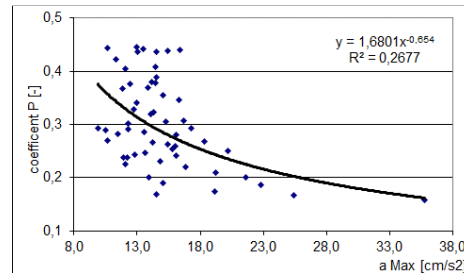
Analiza zależności pomiędzy wartościami szczytowymi przyspieszeń drgań gruntu a przyspieszeniami drgań fundamentu budynku uzależniono w opracowaniu od wielkości przyspieszenia gruntu obok budynku. W tym celu zdefinio-

wano bezwymiarowy współczynnik P jako stosunek przyspieszeń drgań budynku do przyspieszeń drgań gruntu. Wartość ta ma charakter nieliniowy (rys. 7, 8) przy czym współczynnik determinacji dopasowania krzywej ekwipotencjalnej jest zadawalający dla kierunku poziomego drgań ( $R^2=0,672$ ) i niezadawalający dla kierunku pionowego ( $R^2=0,2677$ ).



Rys. 7. Zmiana ekstremalnej amplitudy przyspieszeń dla kierunku poziomego

Fig. 7. Change of the maximum acceleration amplitude for the horizontal direction

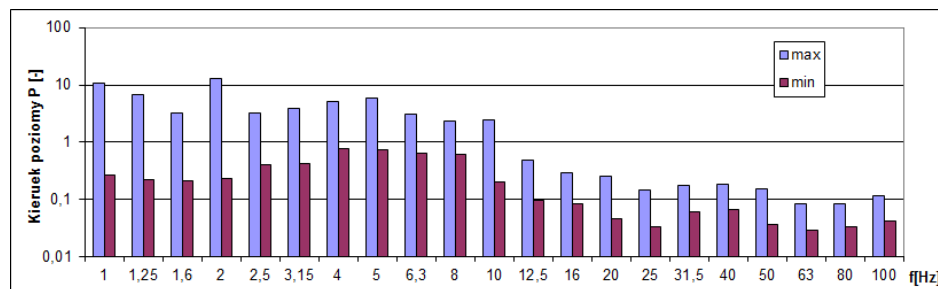


Rys. 8. Zmiana ekstremalnej amplitudy przyspieszeń dla pionowego

Fig. 8. Change of the maximum acceleration amplitude for the vertical direction

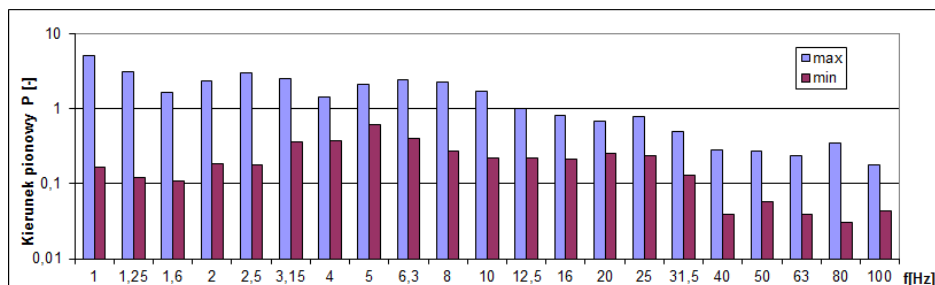
Należy też zwrócić jednak uwagę, że przy ustalaniu obciążenia budynku pomimo podobnego (dla każdego z analizowanych kierunków drgań) trendu zmian współczynnika P jest nieliniowy i maleje wraz ze wzrostem amplitudy przyspieszeń gruntu. Ze względu na niezadawalające dopasowanie współczynnika P w stosunku do ekstremalnych wartości amplitud przyspieszeń zdecydowano się na rozseparowanie odpowiedzi gruntu i budynku na pasma tercjowe 1/3 oktawowo w zakresie wartości maksymalnych amplitud w poszczególnych tercjach.

Wartość tego współczynnika oraz jego zmienności w poszczególnych pasmach tercjowych przedstawiono na rys. 9 i 10



Rys. 9. Zmiana współczynnika P dla kierunku poziomego w zależności od częstotliwości środkowej pasma

Fig. 9. Change of the P factor for the horizontal direction, depending on the center frequency band



Rys. 10. Zmiana współczynnika P dla kierunku pionowego w zależności od częstotliwości środkowej pasma

Fig. 10. Change of the P factor for the vertical direction, depending on the center frequency band

### 3. Wnioski

Okazuje się, że redukcji po przejściu przez granicę faz z gruntu na budynek nie zawsze podlegają wszystkie częstotliwości. Zarówno dla kierunku poziomego jak i pionowego w przypadku analizowanych budynków częstotliwości do 12,5Hz włącznie mogą ulec wzmocnieniu.

W tabelicy 1 pokazano współczynniki funkcji trendu zdefiniowanego parametru „P” (przyjętego w postaci potęgowej ( $y=\alpha \cdot a \cdot \text{Max} \beta$ )) dla poszczególnych wartości środkowych filtrów 1/3 oktaawowych maksymalnych amplitud drgań sygnału w zależności od częstotliwości środkowej pasma tercji. Ostatni wiersz w tab. 1 dotyczy ekstremalnych amplitud jakie występowały w zarejestrowanym sygnale.

Tabela 1. Wartości współczynników funkcji trendu zmiany przejścia pomiędzy przyspieszeniami drgań gruntu i fundamentu budynku dla częstotliwości środkowych analiz 1/3 oktaawowych

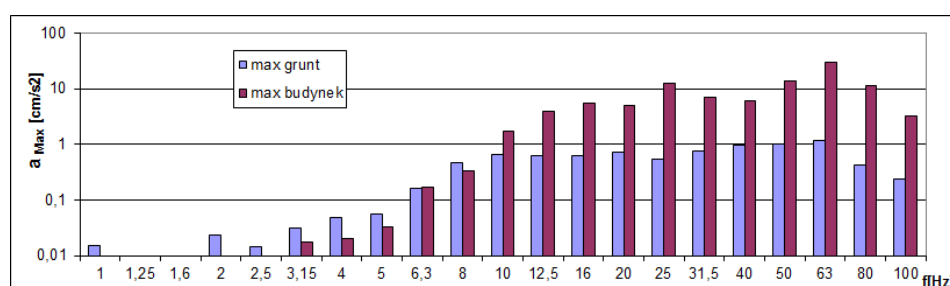
Table 1. Coefficients of the trend function for the transfer function between the ground and the foundation of the building accelerations vibration for the center frequency in the 1/3 octave analysis

f	kierunek wymuszenia			
	poziomy		pionowy	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
[Hz]	[cm/s <sup>2</sup> ]	[s <sup>2</sup> /cm]	[cm/s <sup>2</sup> ]	[s <sup>2</sup> /cm]
1	0,00	-0,91	0,13	-0,26
1,25	0,00	-1,14	0,05	-0,40
1,6	0,00	-1,14	0,09	-0,35
2	0,00	-0,96	0,14	-0,27
2,5	0,04	-0,57	0,23	-0,21
3,15	0,21	-0,34	0,25	-0,24
4	0,14	-0,50	0,24	-0,27
5	0,27	-0,40	0,47	-0,24
6,3	0,58	-0,22	0,70	-0,16
8	0,67	-0,13	0,60	-0,25
10	0,28	-0,35	0,40	-0,13

f	kierunek wymuszenia			
	poziomy		pionowy	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
[Hz]	[cm/s <sup>2</sup> ]	[s <sup>2</sup> /cm]	[cm/s <sup>2</sup> ]	[s <sup>2</sup> /cm]
12,5	0,20	-0,20	0,41	-0,10
16	0,27	-0,58	0,44	0,02
20	0,20	-0,40	0,57	-0,12
25	0,13	-0,34	0,59	-0,18
31,5	0,08	-0,03	0,34	-0,23
40	0,10	-0,17	0,14	-0,12
50	0,11	-0,37	0,17	-0,16
63	0,05	-0,12	0,12	-0,20
80	0,06	-0,07	0,13	-0,33
100	0,09	-0,32	0,10	-0,35
GLOB	1,16	-0,87	1,68	-0,65

W analizie obciążenia konstrukcji w celu właściwego dobrania obciążenia dynamicznego przekazywanego z gruntu na obiekt jest uwzględnienie charakteru zmian na granicy faz w dziedzinie częstotliwości. Dodatkowo zależność tę związać należy z amplitudą przyspieszenia.

Zróźnicowanie w pasmach częstotliwościowych trendu funkcji przejścia wymuszenia pomiędzy gruntem i budynkiem prowadzi do sytuacji (rys. 11) w których ekstremalne przyspieszenia zarejestrowane na gruncie i fundamencie są przesunięte o względem siebie nawet o kilka oktaw.



Rys. 11. Analiza maksymalnych częstotliwości drgań dla sygnału z gruntu i z budynku dla poziomego kierunku poziomy

Fig. 11. Analysis of maximum vibration frequency of the signal from the ground and building for the horizontal direction

Obciążenie modelu projektowanego obiektu przyspieszeniem drgań gruntu zmierzonym w miejscu jego lokalizacji nie jest właściwym. Celowym jest wykonanie pomiarów drgań fundamentu budynku istniejącego (o zbliżonych cechach dynamicznych) i gruntu obok niego. Pozwoli to na znalezienie funkcji przejścia (w dziedzinie częstotliwości) pomiędzy gruntem a budynkiem. Funkcja ta może posłużyć do wyznaczenia obciążenia projektowanego budynku na podstawie pomiarów drgań gruntu w miejscu jego przyszłej lokalizacji. Jak wynika z przedstawionych analiz oszacowane wymuszenie charakteryzuje się dużym współczynnikiem niepewności.

## Literatura

- [1] PN-88/B-02171, Evaluation of vibrations influence on people in buildings, 1988.
- [2] BS 6472-1:2008, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings, Part 1: Vibration sources other than blasting, 2008.
- [3] DIN 4150-2, Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings, 1999.
- [4] Stypuła K., Kozioł K., Prognozowanie wpływów dynamicznych na sąsiednie budynki na przykładzie tunelu kolejowego na lotnisko Okęcie w Warszawie. Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym, INFRASZYN 2015.

- [5] ISO 2631-2, Guide to the evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 2- Vibration in buildings, 2003, International Organization for Standardization.
- [6] Koziół K- The influence of vibration propagation from trams on building vibration caused by ground shaking, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing.
- [7] ISO 6897: Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low frequency horizontal motion (0,063 to 1 Hz), 1984, International Organization for Standardization.

## **IN-SITU MEASUREMENTS AS A WAY TO FORECAST DYNAMIC LOAD ACTING ON BUILDINGS**

### **S u m m a r y**

Constructing civil structures located within the area of dynamic actions engineers should protect its structure as well as people staying inside from adverse vibration influences. One of the key problems in these situations is the proper selection of load acting on the designed building. Author proposes a selection method of extortion using field testing involving the measurement of vibrations on the ground at the site of the future facility. Due to wave nature of vibration propagation at the border between ground and structure we are dealing with collapse and reflection. The problem is complex because vibrations generated by „excitation” have various amplitude-frequency structure. Nevertheless the nature of the amplitude-frequency spectrum is often a feature defining type of excitation (tram, subway train, blasting explosive materials, etc.). The study shows an example of the transfer function, which should be impose on measured ground vibrations in order to determine the load on the foundations of the building. This function has been developed based on the analysis of vibration caused by passing trams acting on structure with specific dynamic characteristics. Therefore the designed building should be characterized by similar dynamic properties.

**Keywords:** impact on people, the impact on buildings, dynamics, time analysis

*Przesłano do redakcji: 28.02.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 28.04.2017 r.*