

DOI: 10.37105/enex.2020.1.1.03

ENGINEERING EXPERT

RZECZOZNAWCA



Analiza wpływu drgań z budowy przekazywanych przez podłoże gruntowe na wybrany budynek mieszkalny i jego użytkowników

Michał BUKAŁA ¹ (ORCID ID: 0000-0002-4172-7754)

Ryszard CHMIELEWSKI ² (ORCID ID: 0000-0001-5662-9180)

Andrzej CHYLA ¹ (ORCID ID: 0000-0001-6647-2375)

Leopold KRUSZKA ² (ORCID ID: 0000-0001-5129-2531)

Paweł OSTATEK ¹ (ORCID ID: 0000-0002-1085-3985)

Kamil SOBCZYK ² (ORCID ID: 0000-0002-5929-757X)

¹ Svantek Sp. z o.o., ul. Strzygłowska 81, 04-872 Warszawa, Polska

² Wojskowa Akademia Techniczna, Zakład Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska

Autor do korespondencji: kamil.sobczyk@wat.edu.pl

Streszczenie: W pracy wykonano analizę szkodliwości drgań generowanych w wyniku robót z wykorzystaniem sprzętu budowlanego, które następnie zostały przekazane przez podłoże gruntowe na sąsiadujący obiektu budowlany oraz jego użytkowników. Młot pneumatyczny i koparka w trakcie prac budowlanych na wschodnio – północnym odcinku II linii metra generowały drgania mechaniczne, które w niniejszym opracowaniu zostały ocenione zgodnie z wymaganiami zawartymi w polskiej normie PN-B-02170:2016-12 i zestawione z dopuszczalnymi wartościami normowymi. Przedstawiono również metodykę prowadzenia badania z uwzględnieniem opisu i lokalizacji punktu pomiarowego oraz charakterystyką wykorzystanej aparatury pomiarowej.

Słowa kluczowe: drgania, podłoże gruntowe, wpływ na budynek.

Oficjalną wersją publikacji jest wersja anglojęzyczna – posiada DOI. Niniejszy plik jest polskojęzyczną wersją.

Zacytuj ten artykuł w następujący sposób:

Bukała M. et al., Analysis impact of construction site vibrations propagated through the ground on a selected residential building and its residents, Engineering Expert, p. 16-23, No. 1, 2020, DOI: 10.37105/enex.2020.1.1.03

1. Wprowadzenie

Obecnie duże aglomeracje miejsce takie jak Kraków, Gdańsk czy Warszawa ulegają ciągłej rozbudowie ze względu na zwiększającą się liczbę mieszkańców. Wraz z rozbudową budynków biurowych i budynków mieszkalnych wielorodzinnych konieczna jest rozbudowa infrastruktury miejskiej obsługującej codziennie mieszkańców tych miast. Trwają nieustanne rozbudowy ulic dla ruchu autobusowego i linii tramwajowych. W Warszawie również prowadzone są prace rozwijające II linię metra o kolejne stacje przesiadkowe, co wynika z zainteresowania sektora publicznego i ogromnych potrzeb mieszkańców na ten rodzaj transportu publicznego. Na obszarach miejskich istotnym czynnikiem jest minimalizowanie ryzyka dla ludzi i mienia na każdym etapie realizacji inwestycji budowlanej. Wykorzystuje się różne metody stosowane na kolejnych etapach planowania, projektowania i budowy tunelu metra, aby zmniejszyć ryzyko negatywnych skutków, np. uszkodzenia okolicznych budynków. Podczas wykonywania konstrukcji podziemnych, takich jak tunele metra, należy konieczne zbadać wpływ na struktury powierzchni wynikający z pracy sprzętu i związanych z tym drgań. Lepsze zrozumienie tego zjawiska jest szczególnie cenne na obszarach miejskich. Ponadto w dzisiejszych budynkach w centrum miast istnieje gęsta zabudowa

i występuje konieczność prowadzenia prac obejmujących tzw. technologie dynamiczne lub wibracyjne w podłożu gruntowym w bardzo bliskim sąsiedztwie istniejących obiektów budowlanych. Powoduje to konieczność monitorowania czy zachodzą okresowe przekroczenia dopuszczalnych poziomów emisji drgań do środowiska, w tym w szczególności budynków mieszkalnych, na który może mieć wpływ nawet niski poziom drgań. Drgania gruntu przenoszone przez ośrodek gruntowy do środowiska miejskiego, takiego jak budynki, po przekroczeniu dopuszczalnych wartości będą miały tendencję do tworzenia deformacji (Yuan et al., 2011), pęknięć na strukturach powierzchniowych oraz mogą powodować drżenie ścian i podłóg (Connolly et al., 2016), (Yang et al., 2018). W analizach należy również pamiętać o wpływie drgań na ludzi przebywających w tych obiektach - osoby mieszkające w budynkach mogą być narażone na działanie dynamiczne pochodzące od prowadzonych robót podziemnych, ale również od czynników naziemnych oraz podziemnych stanowiących tło w częstotliwości o różnych zakresach (Vladimir et al., 2017). Coraz częściej w diagnostyce i projektowaniu budynków istnieje potrzeba uwzględnienia tych działań i weryfikacji spełniania wymagań budowlanych dla komfortu wibracyjnego osób przebywających w budynkach (Kawecki and Kowalska-Koczwara, 2011).

Problematyka negatywnego wpływu szkodliwych drgań, które mają swoją genezę w prowadzonych pracach budowlanych, jest istotna ze względu na przekazywanie tych drgań z podłoża gruntowego na elementy konstrukcyjne i wykończeniowe budynków (projektowanych i istniejących). Ta tematyka stanowi przedmiot wielu badań (Kawecki and Stypuła, 2009), (Tobita and Fukuwa, 2009), (Hashad, 2015), (Chmielewski et al., 2018), (Khabbaz et al., 2019), (Pachla et al., 2019). Zakres występowania tych drgań nieustannie powiększa się, ponieważ na obszarach zurbanizowanych zmniejsza się coraz bardziej dostępność terenów budowlanych, a także są budowane nowe drogi w miastach i na terenach wiejskich w celu poprawy komunikacji w ruchu lądowym.

W celu właściwej oceny negatywnego wpływu szkodliwości drgań w otoczeniu terenu budowy (w tym pochodzących od robót budowlanych na obiekty budowlane) można wykorzystać jedną z norm:

- niemiecką DIN 4150-3 'Structural Vibration Part 3: Effects of vibration on structures (in German)';
- polską PN-B-02170:2016-12 'Assessment of the harmfulness of vibrations transmitted through the ground onto buildings (in Polish)'.

Polska norma pozwala na bardziej kompleksową ocenę sytuacji. Opiera się na skali wpływów dynamicznych (SWD) w przypadku dwóch rodzajów budynków:

- SWD-I – małych budynków o zwartości planu i wysokość do dwóch kondygnacji wysokości;
- SWD-II – budynków o maksymalnej liczbie pięciu kondygnacji, których wysokość jest mniejsza od podwójnej szerokości jest odpowiednia.

W opracowaniu została wykorzystana polska norma PN-B-02170: 2016-12, która opiera się na wykresie amplitudy przyspieszenia w zależności od częstotliwości – wykres podzielono na pięć stref szkodliwości:

- strefa I – drgania nieodczuwalne przez budynek;
- strefa II – drgania odczuwalne przez elementy wykończeniowe budynku (pierwsze rysy w wyprawach i tynkach) powodujące przyspieszone zużycie techniczne budynku, ale nieszkodliwe dla jego konstrukcji nośnej;
- strefa III – drgania szkodliwe dla konstrukcji nośnej budynku, powodujące miejscowe zarysowania i spękania elementów konstrukcyjno-budowlanych, łącznie z odpadaniem wypraw i tynków, osłabiające konstrukcję nośną, zmniejszające jej nośność oraz odporność na dalsze wpływy dynamiczne;
- strefa IV – drgania o dużej szkodliwości dla budynku, zagrażające bezpieczeństwu użytkowania przez ludzi, ponieważ powstają liczne spękania oraz miejscowe uszkodzenia, łącznie z procesem niszczenia przegród murowanych i innych pojedynczych elementów konstrukcyjno-budowlanych budynku, istnieje ryzyko spadania przedmiotów zawieszonych, odpadania fragmentów wypraw tynkarskich sufitów, a także wysuwania się belek stropowych z podparć itp.;

- strefa V – drgania powodujące stan zagrożenia katastrofą budowlaną budynku, budynek nie może być użytkowany.

Niniejsze opracowanie zawiera analizę i ocenę szkodliwości drgań w oparciu o przeprowadzone pomiary wybranego budynku na terenie silnie zurbanizowanym w rejonie budowy wschodnio – północnego II linii metra na odcinku wentylatorni V20. Cel badań polegał na wyznaczeniu wartości drgań generowanych z tej budowy oraz dokonanie zestawienia ich z dopuszczalnymi wartościami normowymi.

2. Charakterystyka budynku

Obiekt budowlany, który stanowi przedmiot badań, jest zlokalizowany na rogu skrzyżowania ulic Gilarskiej i Łokietka, dokładnie przy ulicy Gilarskiej 35A w Warszawie (zaznaczony kolorem czerwonym na mapie - Rys. 1a i Rys. 1b). Znajduje się w wschodnio-północnym rejonie II linii metra. Budynek jest murowany i posiada dwie kondygnacje naziemne (przedstawiono na Rys. 2). Analizowane drgania pochodzą od pracy roboczego sprzętu budowlanego: młota pneumatycznego i koparki.



Rys. 1a. Lokalizacja badanego obiektu budowlanego (zaznaczony kolorem czerwonym na mapie).



Rys 1b. Lokalizacja badanego obiektu budowlanego (zaznaczony kolorem czerwonym na mapie).



Rys. 2. Widok badanego obiektu budowlanego.

3. Metodyka prowadzenia badania

W celu rzetelnej analizy, jak drgania wywołane pracą sprzętu roboczego przy budowie metra wpływają na przedmiotowy obiekt, wykorzystano polską normę PN-B-02170: 2016-12. Budynek spełnia wymagania do zastosowania skali SWD-I – mały budynek o zwartości planu i wysokość do dwóch kondygnacji wysokości. W trakcie badania wykonano pomiary przyspieszenia drgań w prostopadłych osiach X i Y w zależności od czasu. Proces rejestracji obejmował próbkowanie z częstotliwością 750 Hz (zawiera użyteczne pasmo częstotliwości 375 Hz). W ramach opracowania wyników z czasowego przebiegu przyspieszenia drgań wybrano pojedyncze zdarzenia. W każdym przypadku postępowano zgodnie z polską normą PN-B-02170: 2016-12 i wyznaczono widmo szczytowych wyników w zakresie częstotliwości od 1 do 100 Hz.

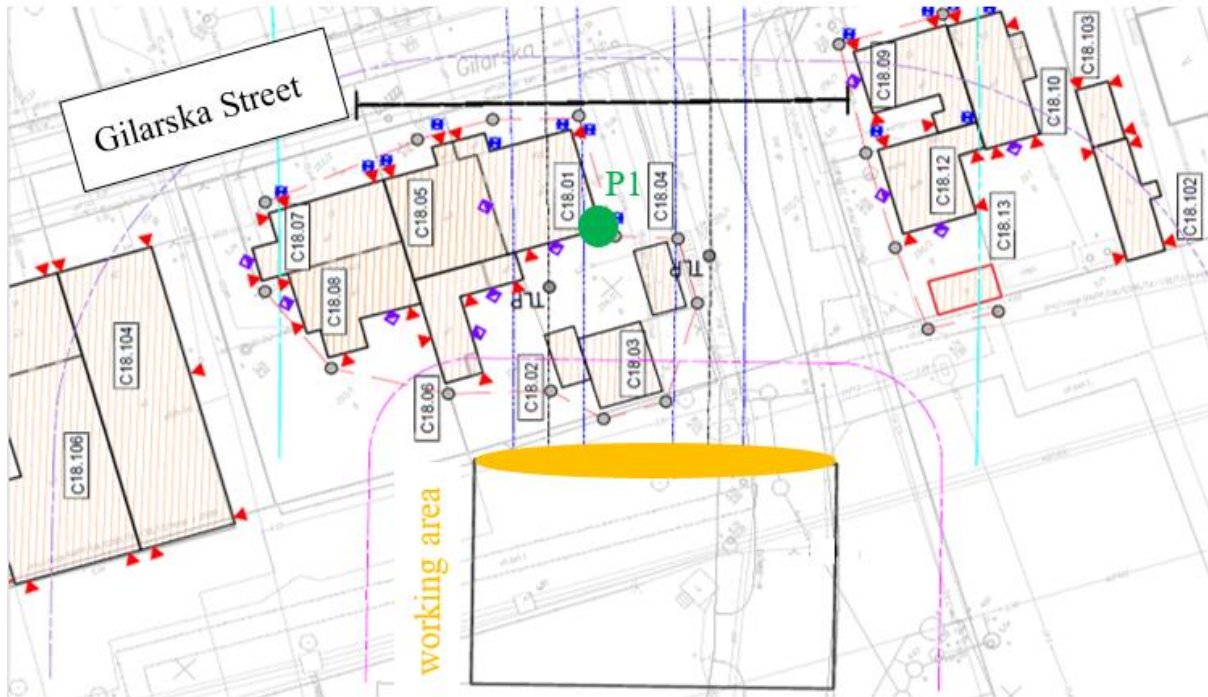
W procesie badania drgań zastosowano sprzęt i aparaturę pomiarową:

- miernik poziomu drgań SVAN 958A nr 36683 (przedstawiony na Rys. 3) wraz z przetwornikiem drgań DYTRAN SV 84 nr E5591 (świadczenie wzorcowania 707/10/2019 z 2019-08-22);
- kalibrator drgań mechanicznych SV111 nr 30596 (świadczenie wzorcowania 628/06/2018 z 2018-08-22);
- oprogramowanie SVAN PC++ i MS Excel;
- osprzęt i okablowanie.



Rys. 3. Miernik poziomu drgań SVAN 958A.

Prace pomiarowe zostały przeprowadzone w jednym punkcie pomiarowym P1 o współrzędnych: 52° 16' 39,8" N i 21° 03' 32,5" E (schemat lokalizacji P1 zaznaczono kolorem zielonym na Rys. 4). Punkt pomiarowy wybrano w odległości około 20 m od źródła drgań (zaznaczone kolorem pomarańczowym na Rys. 4) spowodowanych trwającymi pracami roboczego sprzętu budowlanego: młota pneumatycznego i koparki.



Rys. 4. Schemat lokalizacji punktu pomiarowego P1 (zaznaczony kolorem zielonym) i obszaru pracy sprzętu budowlanego (zaznaczony kolorem żółtym).

Przed przystąpieniem do badania należy wykonać sprawdzenie okresowe przyrządu pomiarowego w postaci kalibracji drgań w mierniku poziomym drgań SVAN 958A – wyniki tego sprawdzenia przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Kalibracja drgań miernika SVAN 958A nr 36683.

Przyrząd pomiarowy	Czas sprawdzenia	Wynik sprawdzenia $\left[\frac{m}{s^2}\right]$			Wartość odniesienia $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
		Ch1	Ch2	Ch3	
SVAN 958A No. 36683	Przed pomiarem	0.98	1.02	0.98	0.99
	Po pomiarze	0.98	1.02	0.98	

W ramach procedury przygotowania do rozpoczęcia badań wykonano również pomiar warunków meteorologicznych – uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiaru warunków meteorologicznych przed rozpoczęciem badań.

	Wartości maksymalne	Wartości minimalne	Wartości średnie
Wysokość pomiaru [m]	3.5		
Temperatura otoczenia [°C]	3	1	2
Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	994	994	994
Wilgotność względna [%]	85	80	83
Prędkość wiatru [m/s]	4.8	0.0	3.9
Uwagi	-		

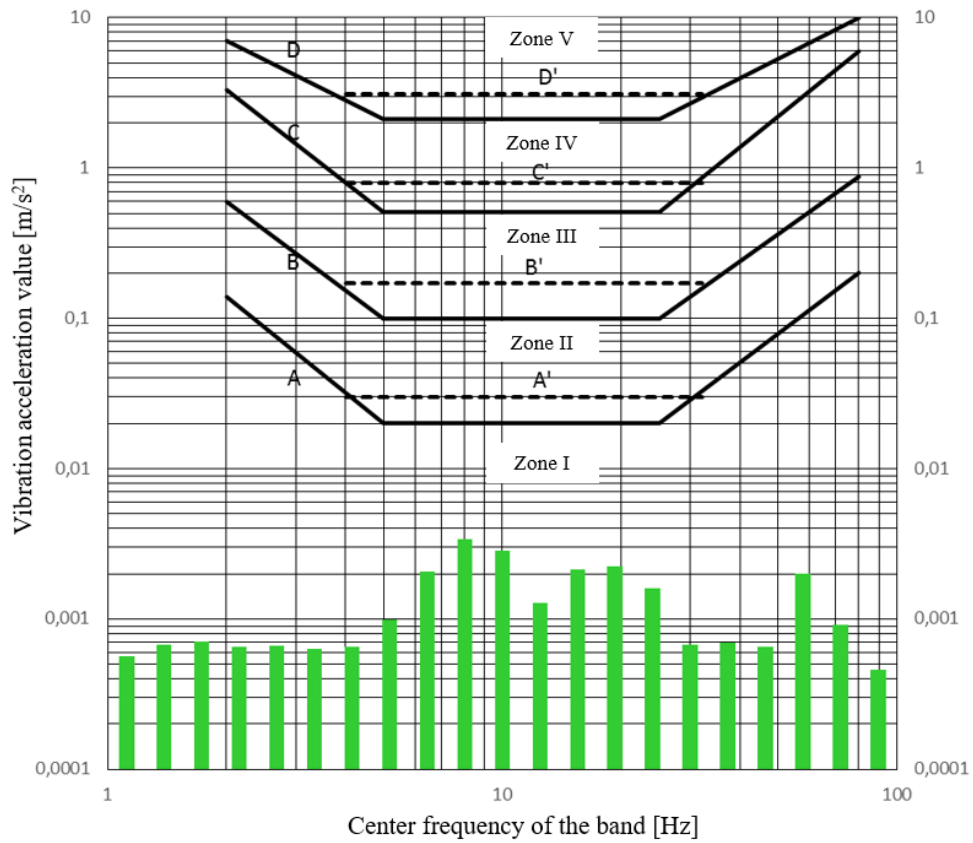
4. Rezultaty badań i ich analiza

Rezultaty pomiaru drgań w postaci szczytowych wartości przyspieszenia drgań a_{peak} przekazywanych przez podłoże na budynek w punkcie pomiarowym P1 przedstawiono w Tabeli 3 dla prostopadłych osi X i Y w zakresie częstotliwości od 1 do 100 Hz. Dla zastosowanej metodyki prowadzenia badań wyniki pomiaru obarczone są niepewnością rozszerzoną przy 95 % poziomie ufności wynoszącą $U_{95} = 10.4\%$ dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$.

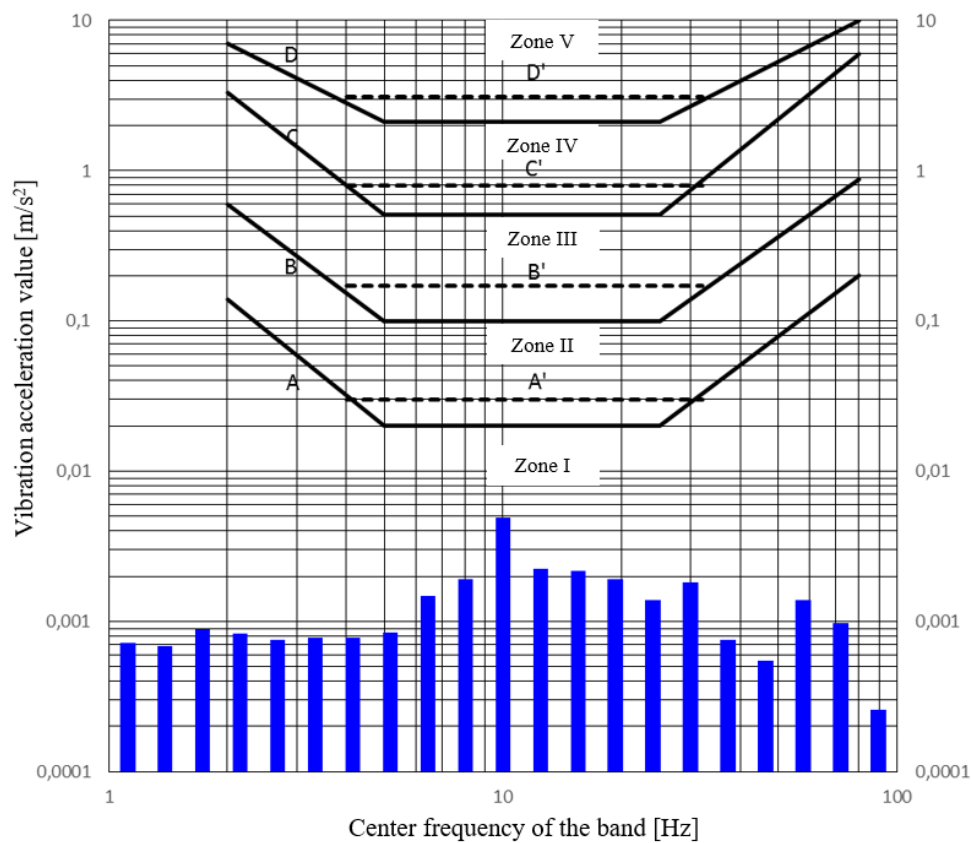
Tabela 3. Rezultaty pomiaru drgań w punkcie P1.

f [Hz]	Szczytowa wartość przyspieszenia drgań $a_{peak} \left[\frac{m}{s^2} \right]$		f [Hz]	Szczytowa wartość przyspieszenia drgań $a_{peak} \left[\frac{m}{s^2} \right]$	
	X axis	Y axis		X axis	Y axis
1	$5.63 \cdot 10^{-4}$	$7.23 \cdot 10^{-4}$	12.5	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$
1.25	$6.74 \cdot 10^{-4}$	$6.86 \cdot 10^{-4}$	16	$2.14 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-3}$
1.6	$7.07 \cdot 10^{-4}$	$8.84 \cdot 10^{-4}$	20	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$
2	$6.55 \cdot 10^{-4}$	$8.25 \cdot 10^{-4}$	25	$1.61 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$
2.5	$6.65 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	31.5	$6.76 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-3}$
3.15	$6.30 \cdot 10^{-4}$	$7.74 \cdot 10^{-4}$	40	$6.95 \cdot 10^{-4}$	$7.50 \cdot 10^{-4}$
4	$6.49 \cdot 10^{-4}$	$7.83 \cdot 10^{-4}$	50	$6.55 \cdot 10^{-4}$	$5.49 \cdot 10^{-4}$
5	$9.97 \cdot 10^{-4}$	$8.47 \cdot 10^{-4}$	63	$1.99 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$
6.3	$2.05 \cdot 10^{-3}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$	80	$9.09 \cdot 10^{-4}$	$9.71 \cdot 10^{-4}$
8	$3.40 \cdot 10^{-3}$	$1.91 \cdot 10^{-3}$	100	$4.62 \cdot 10^{-4}$	$2.57 \cdot 10^{-4}$
10	$2.85 \cdot 10^{-3}$	$4.94 \cdot 10^{-3}$			

W oparciu o polską normę PN-B-02170: 2016-12 należy stwierdzić, że uzyskane rezultaty pomiarów drgań mają wartość przyspieszenia drgań a_{peak} w zakresie strefy I w skali SWD-I. Dla osi X przy pomiarze częstotliwości $f_x = 8 \text{ Hz}$, występuje szczytowa wartość przyspieszenia drgań $a_{max,X} = 3,40 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s^2}$. Dla osi Y przy pomiarze częstotliwości $f_y = 10 \text{ Hz}$, występuje szczytowa wartość przyspieszenia drgań $a_{max,Y} = 4,94 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s^2}$. Rezultaty pomiaru wartości przyspieszeń drgań a_{peak} w skali SWD-I (dla częstotliwości od 1 do 100 Hz) przedstawiono dla osi X na Rys. 5 i dla osi Y na Rys. 6.



Rys. 5. Rezultaty pomiaru wartości przyspieszeń drgań w skali SWD-I dla osi X.



Rys. 6. Rezultaty pomiaru wartości przyspieszeń drgań w skali SWD-I dla osi Y.

6. Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu zaprezentowano analizę wpływu drgań mechanicznych, które były generowane przez roboty budowlane i przekazywane przez podłoże gruntowe do sąsiedniego murowanego budynku dwukondygnacyjnego (zlokalizowany około 20 m od źródła drgań). Przedmiotowe drgania, które pochodziły od pracy młota pneumatycznego i koparki na budowie II linii metra na odcinku wentylatorni V20, badane były za pomocą skali SWD w oparciu o polską normę PN-B-02170: 2016-12 w zakresie częstotliwości od 1 do 100 Hz. Budynek spełniał wymagania do zaklasyfikowania go w skali SWD I – mały budynek o zwartości planu i wysokość do dwóch kondygnacji wysokości. Nie zarejestrowano przyśpieszenia drgań w żadnej strefie szkodliwości. Maksymalną wartość przyśpieszenia drgań $3,40 E^{-04} \frac{m}{s^2}$ zarejestrowano dla osi X przy częstotliwości 8 Hz i wartość $4,94 E^{-03} \frac{m}{s^2}$ dla osi Y przy częstotliwości 10 Hz. Oznacza to, że w całym cyklu badania wszystkie rezultaty ograniczały się tylko do strefy I w skali SWD-I (nie przekraczały nawet dolnej granicy odczuwalności A) i nie należy tych oddziaływań dynamicznych zaliczać do szkodliwych dla analizowanego sąsiadującego obiektu budowlanego i jego użytkowników.

Literatura

- [1] Chmielewski, R., Chyla, A. and Kruszka, L. (2018). Analysis of harmful effects of vibrations and noise coming from construction works on existing buildings and people living in them (in Polish). *Architektura i Budownictwo* 17(3): 79–89.
- [2] Connolly, D. P., Marecki, G. P., Kouroussis, G., Thalassinakis, I. and Woodward, P. K. (2016). The growth of railway ground vibration problems – a review. *Science of the Total Environment*, 568, 1276–1282.
- [3] German standard. DIN 4150-3. Structural Vibration Part 3: Effects of vibration on structures (in German).
- [4] Hashad, A. (2015). Additional stresses on buildings induced by vibration effects. *Water Science*, Volume 29 (2): 134–145.
- [5] Kawecki, J. and Kowalska-Koczwara, A. (2011). Analysis of vibration influence on people in buildings in standards approach. *Conference: Ravage Of The Planet III*, Volume: 148.
- [6] Kawecki, J. and Stypuła, K. (2009). Influence of vibrations generated by road works on historical structures (in Polish). *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, 106, 2-B, 183–189.
- [7] Khabbaz, H., Gibson, R. and Fatahi, B. (2019). Effect of constructing twin tunnels under a building supported by pile foundations in the Sydney central business district. *Underground Space*, Volume 4 (4): 261–276.
- [8] Pachla, F., Kowalska-Koczwara, A., Tatar, T. and Stypuła, K. (2019). The influence of vibration duration on the structure of irregular RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- [9] Polish standard. PN-B-02170: 2016-12. Assessment of the harmfulness of vibrations transmitted through the ground onto buildings (in Polish).
- [10] Tobita, J. and Fukuwa, N. (2009). Ground vibration caused by tunnel construction and its effect on an electron microscope. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, May 2009/111.
- [11] Vladimir, S. and Ilya, T. (2017). To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic. *Procedia Engineering*, 176, 371–380.
- [12] Yang, W., Cui, G., Xu, Z., Yan, Q., He, C., and Zhang, Y. 2018. An experimental study of ground-borne vibration from shield tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 244–252.
- [13] Yuan, C., Wang, X., Wang, N. and Zhao, Q. (2012). Study on the effect of tunnel excavation on surface subsidence based on GIS data management. *Procedia Environmental Sciences*, 12, 1387–1392.