

INTERPRETACJA WYNIKÓW POMIARÓW W BUDYNKACH DRGAŃ WYWOŁANYCH PRZEJAZDAMI POCIĄGÓW METRA NA ODCINKU „BIELAŃSKIM”¹

Krzysztof Stypuła

prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: +48 12 628 2340, e-mail: kstypuła@pk.edu.pl

Barbara Koźuch

mgr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: +48 514 531 847, e-mail: bko-
zuch@pk.edu.pl

Streszczenie. *W publikacji dokonano analizy wpływu drgań komunikacyjnych na budynki przy uwzględnieniu zapewnienia komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach. Wybrane budynki reprezentatywne dla całej zabudowy znajdującej się w strefie wpływów dynamicznych odcinka I linii metra w Warszawie od stacji Słodowiec do stacji Młociny na odcinku o długości ok. 3,9 km poddano analizie na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań. Pomiary zrealizowano w 2009 roku po zakończeniu budowy. Ocenę wpływu drgań na budynki oraz ludzi w budynkach wykonano odpowiednio na podstawie norm PN-85/B-02170 oraz PN-88/B-02171. W artykule przedstawiono zmiany odpowiedzi dynamicznej obiektów w zależności od rodzaju taboru oraz toru, po którym porusza się pojazd. Wszystkie wartości użyte w artykule uzyskano z pomiarów. Pomiary wykonano akredytowane laboratorium - Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli (nr akredytacji AB846) działające w ramach Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej. Dokonano analizy wszystkich przebiegów czasowych, odrzucono dane z zakłóceniami oraz maksymalne przyspieszenia dla każdego z akcelerometrów odczytując wartości średnie oraz maksymalne. Dla każdego z przejazdów obliczono wartości skuteczne (RMS) (przy analizie oddziaływań na ludzi) przyspieszeń drgań w pasmach 1/3 oktaawowych (tercjowych) w przedziale 1-100 Hz. Wyznaczono wskaźniki odczuwalności drgań przez ludzi (WODL).*

Słowa kluczowe: WODL, metro, wpływ drgań na budynki i ludzi, przyspieszenie drgań

1. Wprowadzenie

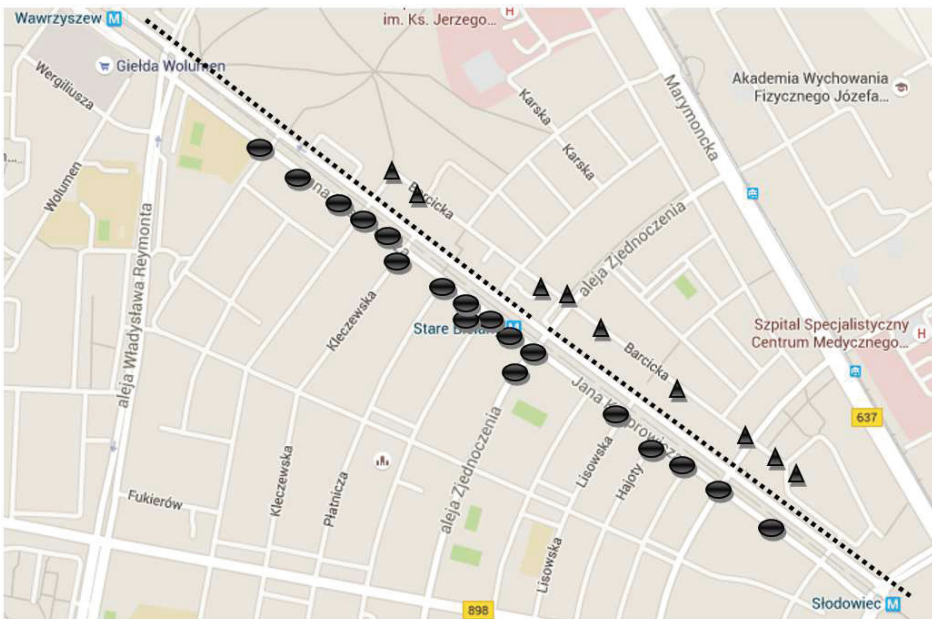
I linia metra w Warszawie, będąc częścią koncepcji kompleksowej rozbudowy miasta, pełni bardzo ważną rolę, zapewniając szybkie połączenie północnej części aglomeracji z południową. Stacje pełnią istotną funkcję węzłów przesiadkowych, umożliwiających połączenie z odległymi dzielnicami miasta. Budowa odcinka metra od stacji Słodowiec do stacji Młociny zakończyła planowany przebieg tej linii. Przez powiązanie węzła A-23 Młociny m.in. z linią tramwajową do Tarchomina oraz parkingiem systemu „Park & Ride” stacja stała się głównym węzłem przesiadkowym obsługującym Łomianki i Białołękę [6].

¹ Wkład autorów w publikację: Stypuła K. 50%, Koźuch B. 50%

Jednak przy staraniach o zapewnienie lepszej komunikacji miasta oraz zwiększenia komfortu podróżnych nie można zapominać o komforcie i bezpieczeństwie ludzi mieszkających w strefie dynamicznych wpływów metra. Z tego względu, po oddaniu do użytkowania wspomnianego odcinka metra – tzw. „bielańskiego”, wykonano pomiary przyspieszeń drgań w budynkach. Na rys. 1 zaznaczono fragment linii, przy którym zrealizowano pomiary oraz oznaczono budynki znajdujące się po wschodniej stronie metra (trójkąty) oraz zachodniej (elipsy).

W opracowaniu przedstawiono dwadzieścia siedem budynków, reprezentatywnych dla całej zabudowy, dla których dokonano analizy wpływu drgań na budynki oraz ludzi przebywających w budynkach zgodnie z normami PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki oraz PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach. Badania wykonano w 2009 r. po oddaniu odcinka do użytkowania.

Wszystkie wartości użyte w artykule uzyskano z pomiarów, przy zakładanym maksymalnym błędzie pomiarowym 11,62%. Pomiary wykonało i udostępniło do analiz akredytowane Laboratorium Badania Odształceń i Drgań Budowli (nr akredytacji AB846), działające w ramach Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej.



Rys. 1. Rozmieszczenie analizowanych budynków(1)

2. Źródło drgań i poligon pomiarowy

Analizie poddano wybrane budynki reprezentatywne dla całej zabudowy znajdujące się w strefie wpływów dynamicznych odcinka I linii metra w Warszawie od

stacji Słodowiec do stacji Młociny. Odcinek bielański o długości ok. 3,9 km budowano metodą odkrywkową, z tego względu znajduje się płytko pod ziemią, co ma ogromne znaczenie przy propagacji drgań.

Pomiary wykonywano za pomocą piezoelektrycznych akcelerometrów umieszczonych na poziomie gruntu na fundamencie budynku (czujniki oznaczone: P-01x, P-02y, P-03z) – służące ocenie wpływu wibracji na budynek oraz na środku stropów (czujnik P-04z) – w celu identyfikacji drgań wpływających na ludzi w budynkach. Przetworniki ustawiono odpowiednio:

- P-01x w poziomie, w kierunku prostopadłym do osi toru metra,
- P-02y w poziomie, równoległe do osi toru oraz P-03z i P-04z w pozycji pionowej.

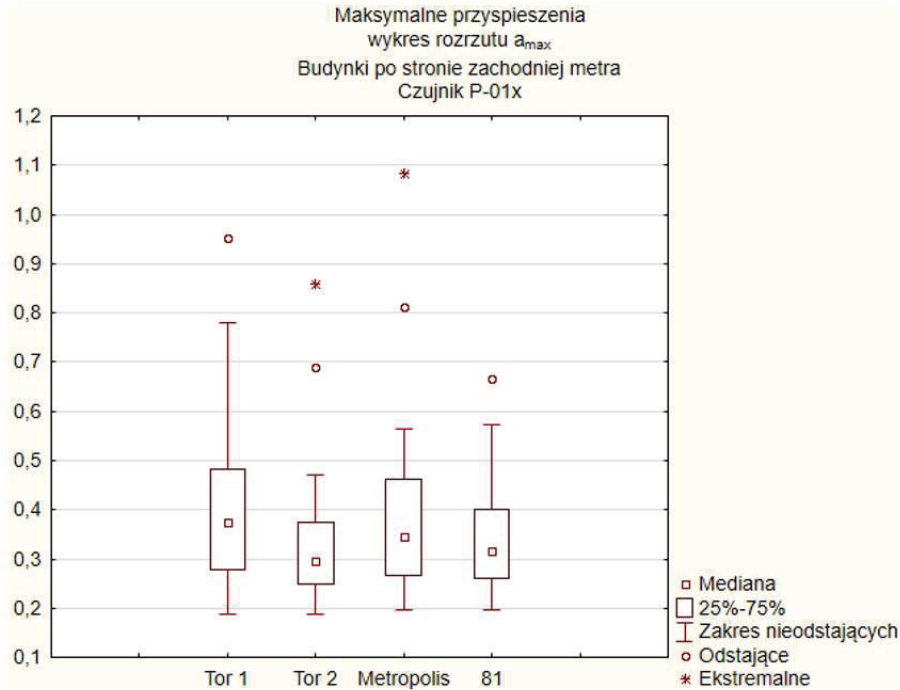
Przejazdy pociągów metra stanowiące źródło drgań odbywały się po torze 1 i 2 linii. W trakcie pomiarów na linii eksploatowano dwa typy pojazdów: rosyjskiej produkcji wagony typu „81” oraz wagony koncernu Alstom o nazwie „Metropolis” [4, 5].

Zgodnie z literaturą [3] sytuację diagnostyczną zaklasyfikowano, jako: A – eksploatowane źródło drgań oraz eksploatowany obiekt odbierający drgania.

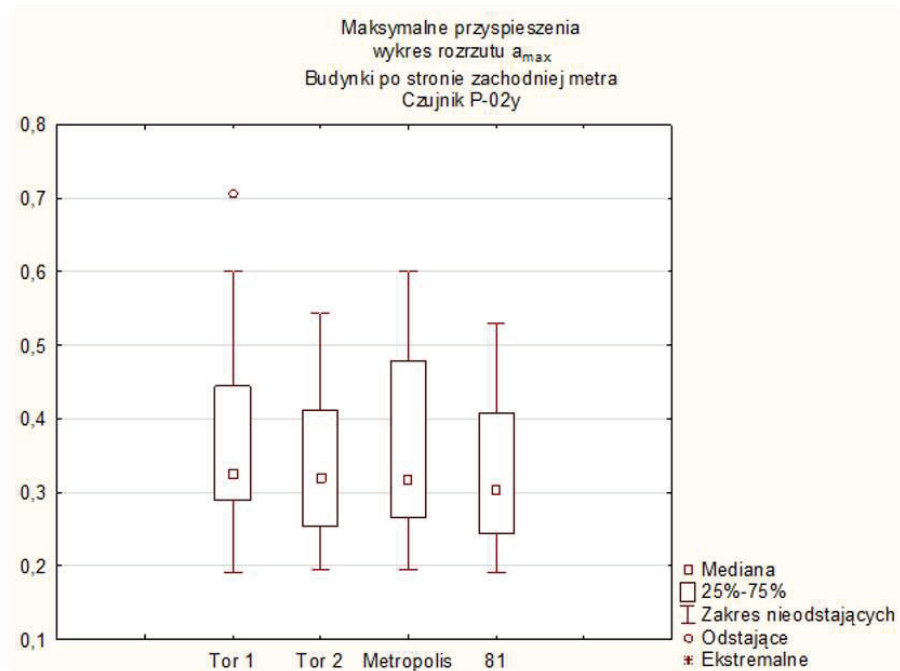
3. Analiza przebiegów czasowych

Dokonano analizy wszystkich przebiegów czasowych, odrzucono dane z zakłóceniami, po czym odczytano maksymalne przyspieszenia każdego z przebiegów. Zestawiono maksymalne przyspieszenia, dla każdego z akcelerometrów obliczono wartości średnie w zależności od typu pociągu, który stanowił źródło drgań oraz od toru, po którym się poruszał. Na rysunkach 2-9 przedstawiono kolejno rozrzut przyspieszeń maksymalnych analizowanych budynków dla akcelerometrów umieszczonych na fundamencie (P-01x, P-02y, P-03z) oraz czujnika umieszczonego na stropie parteru (P-04z), oddzielnie dla budynków po wschodniej i zachodniej stronie metra.

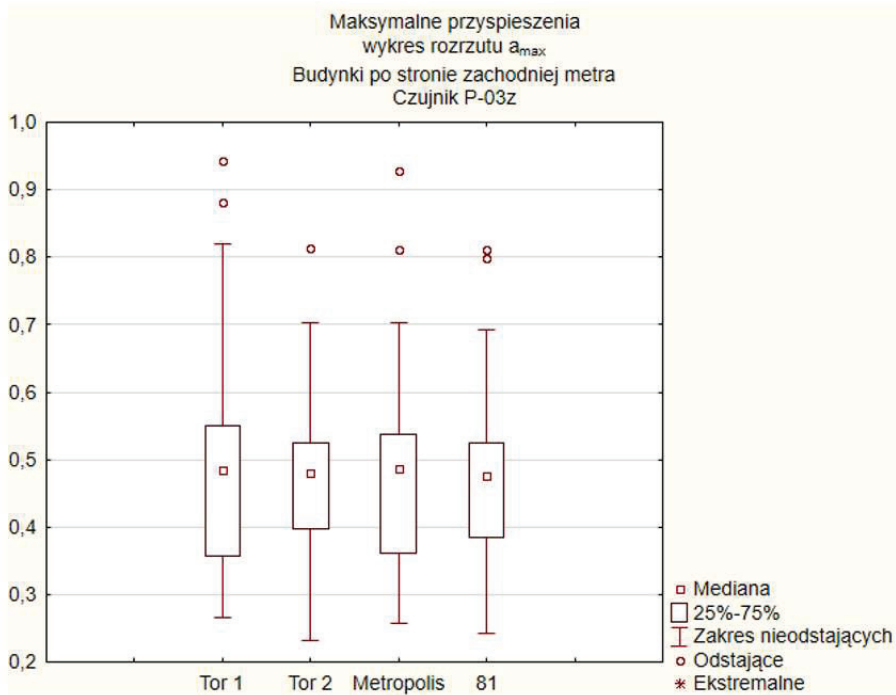
Ogólna analiza danych nie wykazała znaczących różnic w wartościach otrzymanych z toru 1 i 2. Również wartości generowane przejazdami taboru rosyjskiego oraz firmy Alstom nie odbiegały znacząco od siebie. Jednak przy bardziej wnikliwej analizie można zwrócić uwagę na fakty, iż wszystkie czujniki rejestrowały nieznacznie większy rozrzut wartości środkowych (25%-75%) oraz minimalnie większą medianę dla toru 1 w zachodnich budynkach na wszystkich czujnikach oraz we wschodnim budynku na czujniku P-01x. Porównując typy taboru, wszystkie czujniki wykazały większe mediany wywołane przejazdami pociągu firmy Alstom. Większe wartości z zakresu 25%-75% dla przetworników P-02y we wschodnich budynkach generowały przejazdy taboru „81”, a dla pozostałych akcelerometrów pociągi Metropolis. Istotne różnice ujawniają się przy porównaniu odczytów z różnych akcelerometrów. Przetworniki umieszczone na stropie rejestrowały średnio nawet dziesięciokrotnie wyższe wartości przyspieszeń drgań niż czujniki umieszczone na fundamencie.



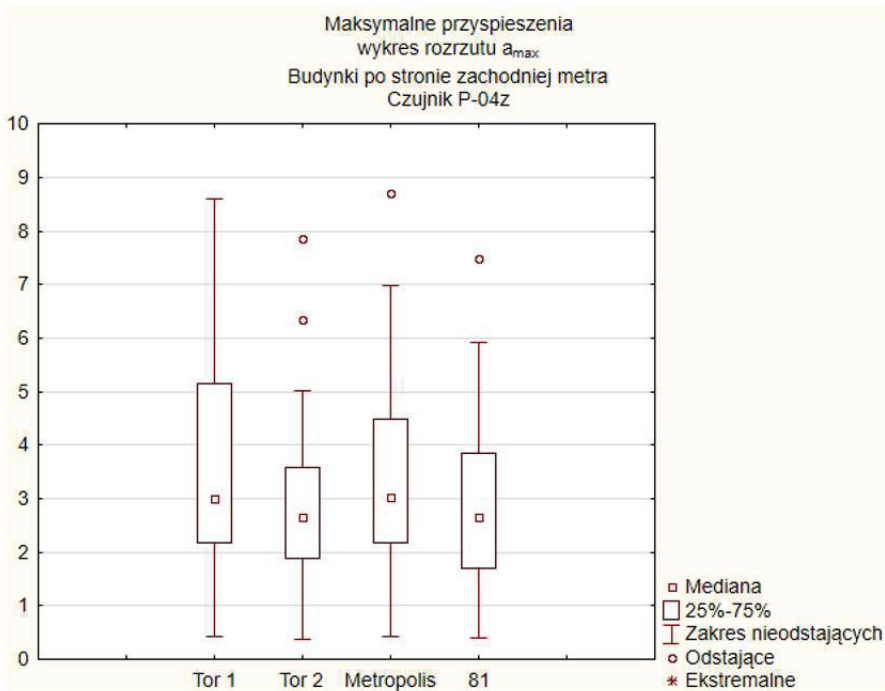
Rys. 2. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-01x w budynkach po stronie zachodniej metra



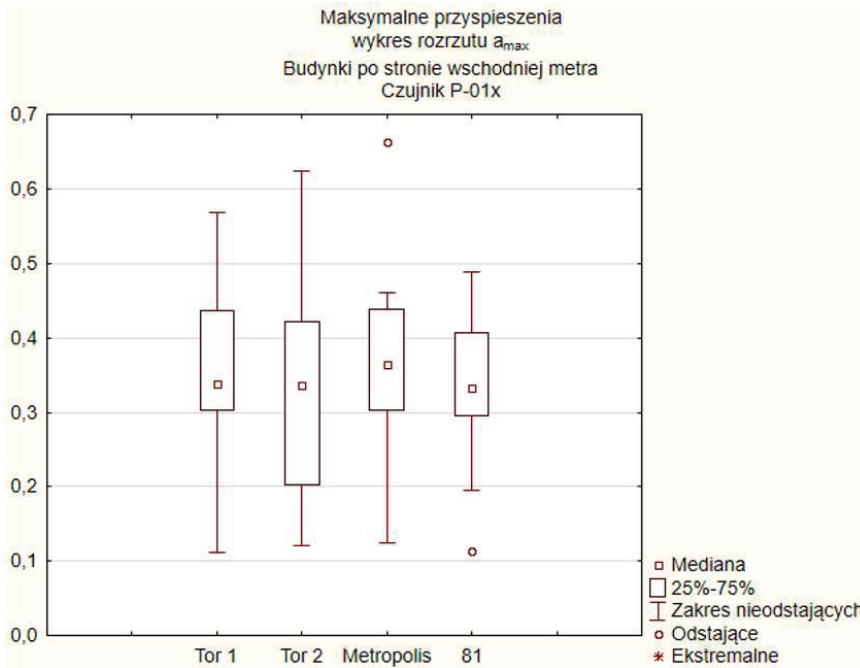
Rys. 3. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-02y w budynkach po stronie zachodniej metra



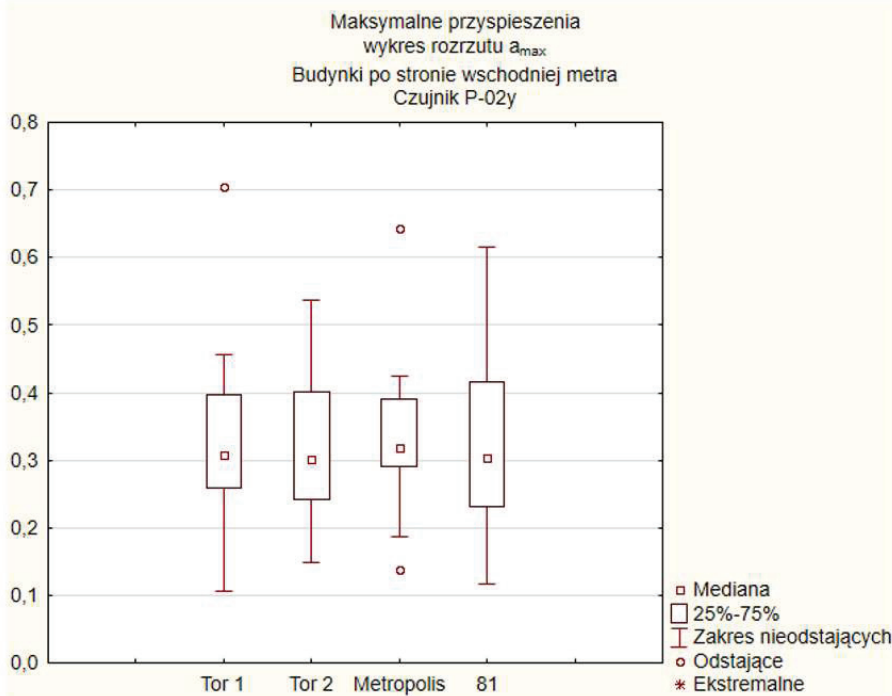
Rys. 4. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-03z w budynkach po stronie zachodniej metra



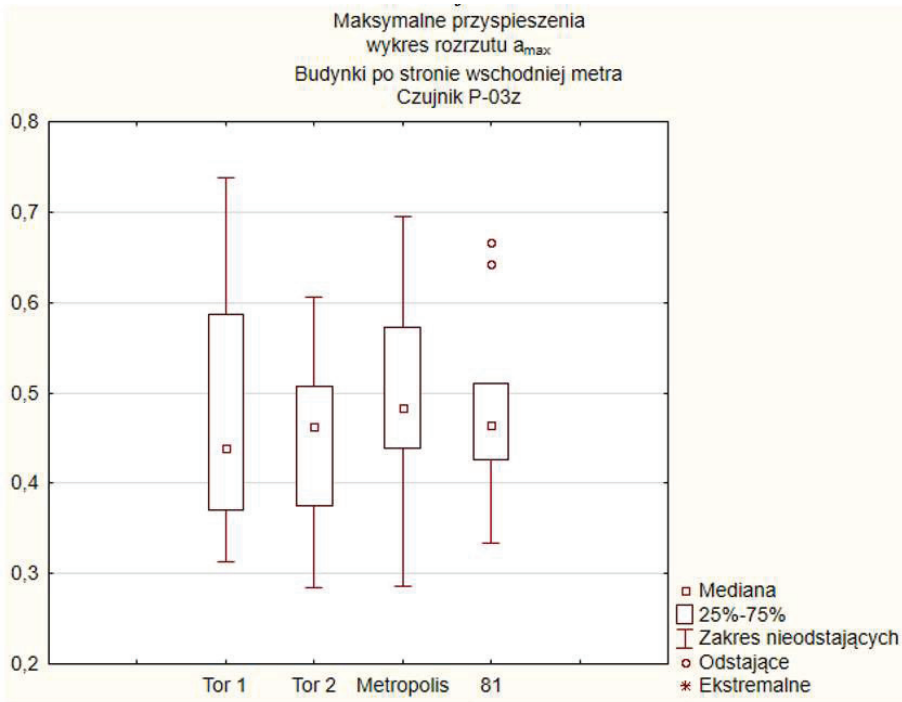
Rys. 5. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-04z w budynkach po stronie zachodniej metra



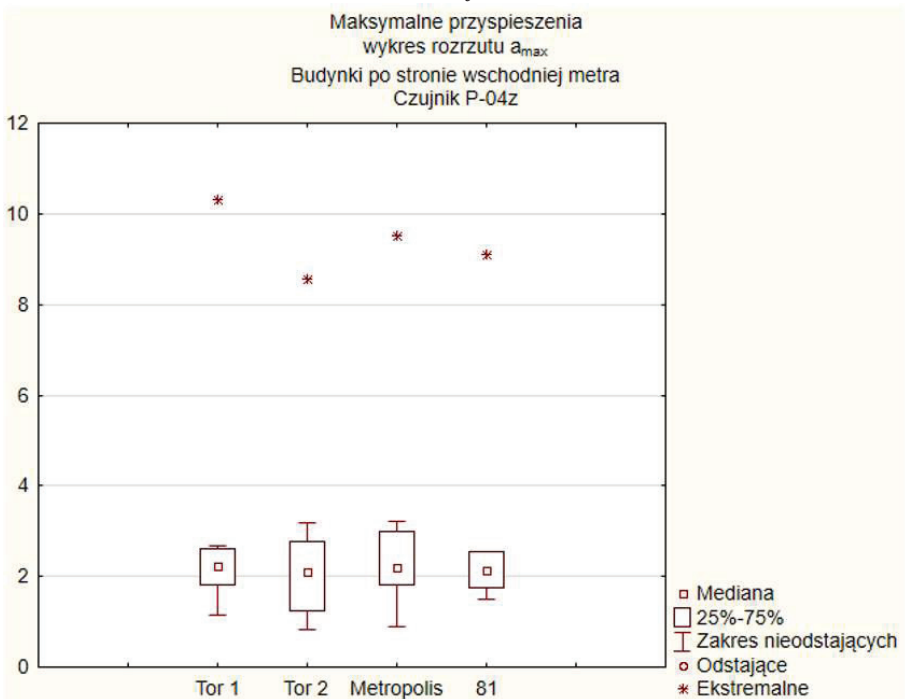
Rys. 6. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-01x w budynkach po stronie wschodniej metra



Rys. 7. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-02y w budynkach po stronie wschodniej metra



Rys. 8. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-03z w budynkach po stronie wschodniej metra



Rys. 9. Wykres rozrzutu przyspieszenia maksymalnego a_{max} dla czujnika P-04z w budynkach po stronie wschodniej metra

Otrzymane wartości z wykresów rozrzutów przyspieszeń maksymalnych nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, który z eksploatowanych pociągów generuje mniejsze drgania. Z tego względu posłużono się wzorem (1), obliczając procentowy spadek maksymalnego przyspieszenia. Dla każdego z budynków obliczono spadek przyspieszeń maksymalnych toru drugiego w stosunku do toru pierwszego oraz taboru typu „81” w stosunku do Metropolis. Średnie i mediany wszystkich pomiarów zestawiono w tabelach 1 i 2 w zależności od położenia budynków. Wartości dodatnie świadczą o większych przyspieszeniach toru pierwszego oraz taboru Metropolis w stosunku odpowiednio do porównywanych, toru drugiego i taboru „81”. Największe spadki maksymalnego przyspieszenia w obu porównaniach zanotowano na czujniku P-04z, natomiast najmniejsze na drugim pionowym czujniku P-03z, co może świadczyć o większej wrażliwości stropów na zmiany drgań. Otrzymane wartości świadczą o większej dynamiczności taboru Metropolis. Wyjątek stanowią czujniki pionowe na budynkach od wschodniej strony metra przy porównaniu taboru. Średnie tych akcelerometrów wskazują na większą wartość drgań wywołanych przejazdami pociągów rosyjskiej produkcji, jednak nie potwierdza tego wartość środkowa z porównywanych przejazdów.

$$W_R = \frac{A_{\max_1} - A_{\max_2}}{A_{\max_1}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

W_R – procentowy spadek maksymalnego przyspieszenia [%];

A_{\max_1} – średnia uzyskana z maksymalnych przyspieszeń odpowiednio dla toru 1 lub taboru Metropolis [m/s^2];

A_{\max_2} – średnia uzyskana z maksymalnych przyspieszeń odpowiednio dla toru 2 lub taboru „81” [m/s^2].

Tabela 1. Spadek maksymalnego przyspieszenia drgań w zależności od toru oraz taboru dla budynków po wschodniej stronie linii metra

Procentowy spadek maksymalnego przyspieszenia dla budynków po wschodniej stronie metra					
Porównanie	Czujnik	P-01x	P-02y	P-03z	P-04z
Tor 1 - Tor2	średnia	5%	0%	4%	13%
	mediana	6%	8%	9%	19%
Metropolis - 81	średnia	3%	1%	-2%	-6%
	mediana	7%	4%	4%	5%

Tabela 2. Spadek maksymalnego przyspieszenia drgań w zależności od toru oraz taboru dla budynków po wschodniej stronie linii metra

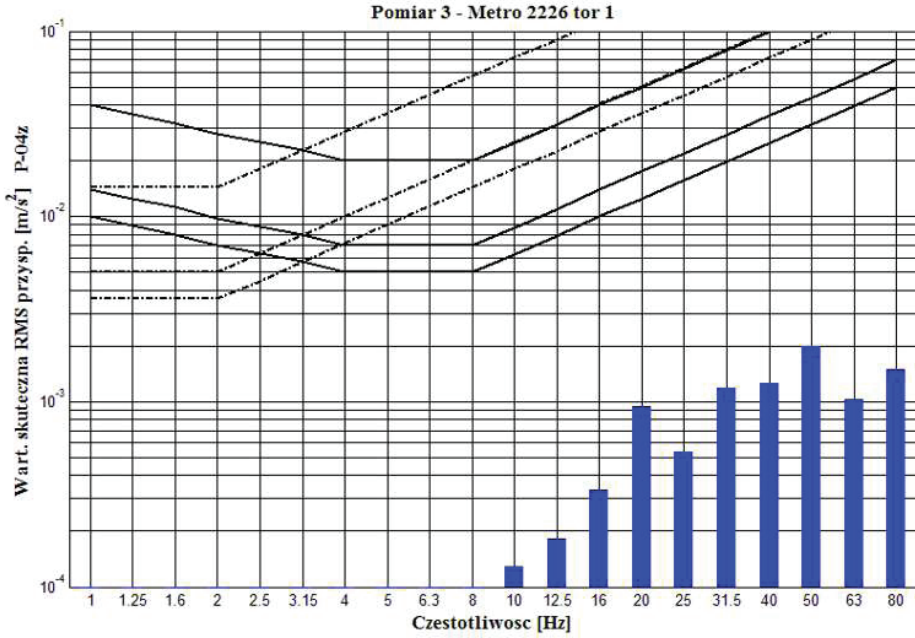
Procentowy spadek maksymalnego przyspieszenia dla budynków po zachodniej stronie metra					
Porównanie	Czujnik	P-01x	P-02y	P-03z	P-04z
Tor 1 - Tor2	średnia	14%	8%	2%	13%
	mediana	14%	6%	7%	17%
Metropolis - 81	średnia	11%	10%	0%	14%
	mediana	8%	9%	3%	15%

4. Wskaźnik odczuwalności drgań przez ludzi WODL

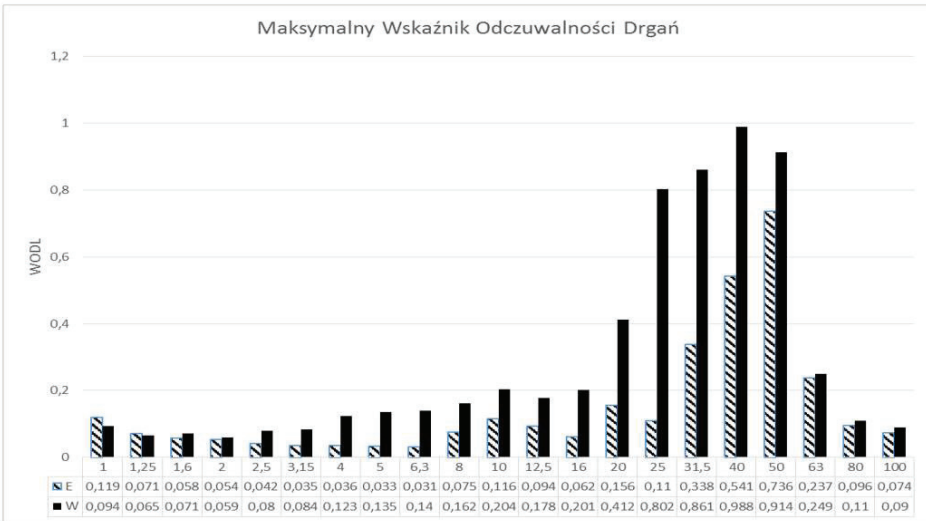
Za pomocą filtrów 1/3 oktawowych dokonano rozkładu wszystkich przebiegów czasowych na przyspieszenia w pasmach 1/3 oktawowych, a następnie obliczono wartości wskaźnika odczuwalności drgań przez ludzi. Wskaźnik WODL jest to największa spośród wyznaczonych w poszczególnych pasmach 1/3 oktawowych wartości stosunku RMS przyspieszeń drgań wyznaczonych w wyniku analizy wibrogramu w pasmach tercjowych do wartości przyspieszenia odpowiadającej progowi odczuwalności drgań przez ludzi. Użyteczność takiego współczynnika polega na uniezależnieniu ostatecznego wyniku analizy od pasma częstotliwości, ponieważ WODL wskazuje bezpośrednio ile razy został przekroczony próg odczuwalności drgań przez ludzi [2].

Przykładowy wibrogram umieszczono na rys. 10. Linie ciągłe odpowiadają poszczególnym progom odczuwalności drgań przez człowieka w ciągu dnia (drgania wzdłuż osi kręgosłupa), linie przerywane - w nocy (drgania poprzecznie do osi kręgosłupa). Słupki wyznaczają wartości otrzymanych przyspieszenia drgań dla odpowiednich pasm 1/3 oktawowych.

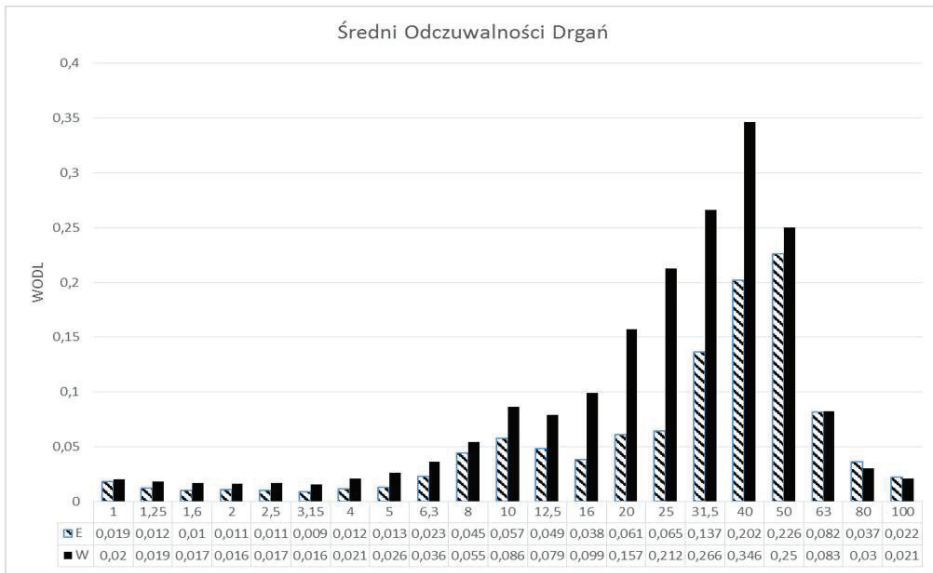
Dla każdego z budynków w każdej tercji wybrano przejazd najmniej korzystny (generujący największe wartości WODL). Zestawiono wszystkie ekstremalne wartości dla reprezentatywnej zabudowy w otoczeniu odcinka Bielańskiego, obliczając maksymalny współczynnik odczuwalności drgań przez ludzi. Wyniki przedstawiono na rys. 11 w podziale na budynki znajdujące się po wschodniej (oznaczone literą E) i zachodniej stronie metra (oznaczone literą W). Analogicznie zestawiono średnie wartości WODL na rys. 12. Widmo drgań wykazuje ekstrema w wyższych częstotliwościach (25-50 Hz), co jest charakterystyczne dla źródła drgań, jakim jest metro. Dzięki zastosowanym matom wibroizolacyjnym w tunelu, drgania odbierane przez ludzi w budynkach nie przekraczają dopuszczalnych wartości (WODL nie przekracza wartości 1).



Rys. 10. Przykład wibrogramu {5}



Rys. 11. Wykres maksymalnych WODL dla reprezentatywnych budynków

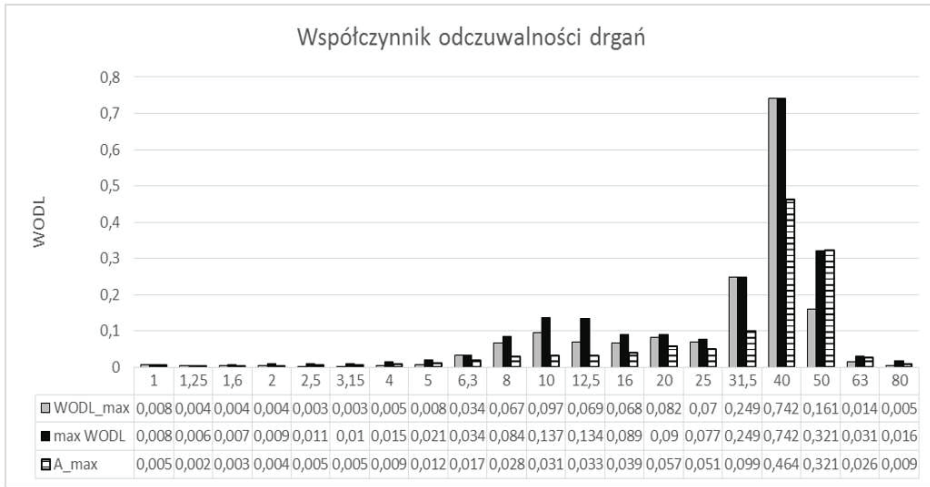


Rys. 12. Wykres uśrednionych WODL dla reprezentatywnych budynków

5. Porównanie wskaźnika odczuwalności drgań z przyspieszeniem maksymalnym

Dokonano porównania wskaźnika odczuwalności drgań (WODL) oraz maksymalnego przyspieszenia przebiegu czasowego dla czujników umieszczonych na stropach. Dla każdego z budynków wybrano przejazd charakteryzujący się największym przyspieszeniem maksymalnym, po czym porównano WODL otrzymany z tego przejazdu z najwyższym WODL otrzymanym dla budynku. Spośród analizowanych budynków tylko w ok. 30% przypadkach największa amplituda przyspieszenia drgań wywoływała najbardziej niekorzystny wskaźnik odczuwalności drgań. W pozostałych przypadkach najbardziej niekorzystny wskaźnik odczuwalności drgań przez ludzi powodowały przejazdy, których amplitudy przyspieszeń plasowały się na drugim lub dalszych miejscach. Pomimo tej rozbieżności przejazdy o najbardziej niekorzystnym WODL oraz przejazdy osiągające największe przyspieszenia drgań, w przeszło 85% przypadkach osiągały ekstrema wartości WODL w tych samych pasmach 1/3 oktawowych. Na rys. 13 przedstawiono rozkład wskaźnika odczuwalności drgań dla jednego z analizowanych budynków. Zestawiono wartości WODL w trzech kategoriach: A_max - obliczone z przebiegu charakteryzującego się największą wartością maksymalną przyspieszeń drgań; WODL_max - obliczone z jednego przebiegu, w którym wystąpiła najwyższa wartość WODL; maxWODL – najgorsze wskaźniki dla każdej tercji ze wszystkich przebiegów dla danego budynku. Dla każdego z przypadków największe wartości znajdowały się w paśmie 40 Hz. Widoczna jest istotna różnica w wartościach ge-

nerowanych z najgorszego przejazdu pod względem maksymalnych przyspieszeń a maksymalnego współczynnika odczuwalności drgań.



Rys. 13. Wykres WODL dla wybranego budynku

6. Wnioski

I linia metra będąc integralną częścią komunikacji miasta stołecznego Warszawy umożliwia pasażerom wygodne i sprawne poruszanie się w aglomeracji. Jednak komfort podróżnych nie może ujemnie wpływać na komfort mieszkańców. Z tego względu, przy każdej inwestycji generującej zanieczyszczenia środowiska, jakimi są drgania, należy dołożyć wszelkich starań w celu usunięcia lub maksymalnej niwelacji wpływów dynamicznych na budynki i ludzi w nich przebywających. Mając powyższe na uwadze, przy budowie ostatniego odcinka I linii metra zaprojektowano maty wibroizolacyjne oraz dokonano pomiarów drgań w strefie dynamicznych wpływów metra.

Analizując przebiegi czasowe wykazano nieznaczną różnicę w otrzymywanych maksymalnych przyspieszeniach drgań na niekorzyść toru 1 oraz taboru konsorcjum Alstom. Tor 2 oraz pociągi rosyjskiej produkcji można by wskazać na podstawie analiz średnich ze wszystkich budynków, jako czynniki generujące mniejsze drgania. Jednak analiza każdego budynku z osobna nie zawsze potwierdzała powyższą tezę. Dlatego nie można jednoznacznie wskazać toru lub taboru generującego wyższe wibracje budowli w otoczeniu metra.

Badając maksymalne współczynniki oddziaływań dynamicznych na ludzi można zauważyć, iż eksploatacja bielańskiego odcinka metra nie wpływa negatywnie na komfort i zdrowie mieszkańców Warszawy. Zestawienie WODL ukazuje, iż nawet maksymalne otrzymane współczynniki nie przekraczają progu odczuwalności drgań przez ludzi.

W publikacji wykazano, iż przebieg czasowy charakteryzujący się najwyższą wartością maksymalnych przyspieszeń drgań nie zawsze jest najbardziej niekorzystnym przebiegiem pod względem wpływu na człowieka. Rozpatrując przebiegi czasowe należy z każdego wyznaczyć przyspieszenia w pasmach tercjowych, a następnie obliczyć współczynniki oddziaływań dynamicznych zgodnie z normą PN-88/B-02171 „Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach”, aby określić najbardziej niekorzystny wpływ na człowieka. W przypadku obliczania wartości WODL tylko dla najgorszego przebiegu czasowego możemy pominąć istotny przebieg, zaniżając rzeczywisty wpływ drgań na człowieka.

Bibliografia

- [1] <https://mapy.google.pl>.
- [2] Kawecki J., Stecz P., Stypuła K., O konieczności wykonywania obliczeń symulacyjnych wibroizolacji w torze tramwajowym., *Czasopismo Techniczne*, Seria: Budownictwo, z.3-B, Kraków 2011, s. 163-173.
- [3] Kawecki J., Stypuła K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2013 r.
- [4] Metro Warszawskie Sp. z o. o., Oficjalny serwis internetowy, dostępne: www.metro.waw.pl/informacje-o-taborze.html.
- [5] Stecz P., Chęłmecki J., Jordanek B., Jurkiewicz W., Jurkiewicz P., Juszczyńska S., Sprawozdania z badania nr 01/2009. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Laboratorium Badania Odkształceń i Drgań Budowli, Kraków 2009 r.
- [6] Stowarzyszenie Integracji Społecznej Edukacji, Metro – I linia Kabaty Młociny, dostępne: www.siskom.waw.pl/kp-metro-1.htm.

